

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ÉVALUATION DU RÉGIME DE PRÉCIPITATION AU MAGHREB TEL QUE
SIMULÉ PAR LES MODÈLES RÉGIONAUX DU CLIMAT : OCCURRENCE,
DURÉE ET INTENSITÉ DES PRÉCIPITATIONS QUOTIDIENNES

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ATMOSPHÈRE

PAR

MARIEM JELASSI

SEPTEMBRE 2015

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Je souhaite tout d'abord remercier et témoigner toute ma reconnaissance au Dr Philippe Gachon qui a dirigé ce mémoire. Je le remercie d'avoir accordé toute sa confiance et pour le temps qu'il m'a consacré tout au long de ma maîtrise à l'Université du Québec à Montréal. Sa rigueur scientifique et ses conseils m'ont permis de me dépasser, au-delà de mes espérances.

Je tiens à remercier mon co-directeur, le Pr René Laprise, pour m'avoir accordé toute sa confiance et pour le temps qu'il m'a consacré tout au long de mes études. Je le remercie également pour ses commentaires et critiques très constructives durant mes séminaires sur ce projet de recherche.

Je remercie aussi Emilia Paula Diaconescu, Rabah Aider, Christian Saad, Guillaume Dueymes et Katja Winger pour leur soutien informatique et pour l'efficacité avec laquelle ils ont toujours répondu à mes questions. Je remercie également l'ensemble du corps professoral et les étudiants en maîtrise.

Je remercie aussi ma famille qui m'a beaucoup soutenu moralement durant ma maîtrise. Je ne peux m'empêcher de remercier Loubna Benyahya pour ses nombreux conseils. Merci également à Ghassen Zagden d'avoir été, toujours, à l'écoute des problèmes que j'ai rencontrés et pour s'être penché sérieusement sur mon travail lorsque j'en avais besoin. Je remercie également tous mes amis pour leurs supports.

TABLE DE MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	IV
LISTE DES TABLEAUX.....	VIII
RÉSUMÉ.....	1
INTRODUCTION.....	2
CHAPITRE I	
REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	8
1.1 Contexte climatique du Maghreb	8
1.1.1 Climat moyen au Maghreb	8
1.1.2 Variabilité historique et extrêmes climatiques	11
1.1.3 Mécanismes atmosphériques et influences des anomalies de la TSM sur la variabilité de la précipitation.....	12
1.2 Indices de précipitation (extrêmes et variabilité)	13
1.3 Modèles Régionaux du Climat.....	14
1.4 Les changements anticipés au cours du 21 ^e siècle	14
CHAPITRE II	
EVALUATION DU REGIME DE PRECIPITATION AU MAGHREB TEL QUE SIMULE PAR LES MODELES REGIONAUX DU CLIMAT : OCCURRENCE, DUREE ET INTENSITE DES PRECIPITATIONS QUOTIDIENNES	16
2.1 Introduction	19
2.2 Région d'étude, données et méthodes	22
2.2.1 Région d'étude et ses caractéristiques physiographiques et climatiques..	22
2.2.2 Données utilisées	25
2.2.3 Méthode d'analyse.....	31
2.3 Résultats	37
2.3.1 Analyse du régime de précipitations au Maghreb	37
2.3.2 Liens entre les tempêtes, les indices de l'ONA et de précipitation	46
2.4 Conclusion.....	49
CONCLUSION	76

RÉFÉRENCES.....	103
ANNEXE A	
CONTEXTE SOCIO-ÉCONOMIQUE	83
ANNEXE B	
CONTEXTE CLIMATOLOGIQUE.....	84
ANNEXE C	
EXEMPLES D'EFFETS DES ALÉAS HYDROMÉTÉOROLOGIQUES AU MAGHREB.....	90
ANNEXE D	
ANALYSES DES LIENS ENTRE LES TEMPÊTES, ONA ET LA PRÉCIPITATION	95

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
1.1 Carte de la région d'étude. (Source : http://cartographie.sciences-po.fr/sites/default/fuiles/10_maghreb_physique).....	9
2.1 a) Le domaine de simulation CORDEX Afrique, avec le Maghreb (encadré en rouge) et le Nord du Maghreb qui inclut les sous-régions utilisées dans cette étude (encadré en bleu) et b) le sous-domaine utilisé pour l'analyse des simulations de MRCs sur le Maghreb.	23
2.2 Carte du relief dans les trois pays du Maghreb (en m). (Source : Global 30 Arc-Second Elevation (GTOPO30) data courtesy of the U.S. Geological Survey).....	25
2.3 Moyennes saisonnières de l'occurrence de jours de pluie (en %, i.e. indice Prcp1 défini au tableau 2.3) sur la période 1998-2008 durant l'automne (SON, panneaux de gauche) et l'hiver (DJF, panneaux de droite), pour les données d'observations (E-OBS, GPCP), les réanalyses (NCEP-R1, NCEP-R2, ERA-Interim), et les modèles (MRCC5, CanRCM4-044 et CanRCM4-022). Dans les panneaux pour E-OBS les points de grille en blanc représentent les endroits avec des valeurs manquantes.....	56
2.4 Idem à la figure 2.3, mais pour le nombre maximal (en jour) de jours secs consécutifs (précipitation < 1mm/jour, cf. CDD défini au tableau 2.3), en automne (panneaux de gauche) et en hiver (panneaux de droite).....	57
2.5 Idem à la figure 2.3, mais pour l'intensité moyenne de précipitations par jours humides (en mm/J) définis (seuil ≥ 1 mm cf. SDII défini au tableau 2.3), en automne (panneaux de gauche) et en hiver (panneaux de droite).	58
2.6 Idem à la figure 2.3, mais pour le 90 ^e centile de précipitations quotidiennes en (mm/J) (cf. Prec90p défini au tableau 2.3), en automne (panneaux de gauche) et en hiver (panneaux de droite).....	59
2.7 Idem à la figure 2.3, mais pour le cumul saisonnier de précipitation (en mm) en automne (panneaux de gauche) et en hiver (panneaux de droite).	60
2.8 Distributions de fréquence de précipitation selon les valeurs d'intensité quotidienne (en mm/jour) sur la période 1998-2008 durant l'automne (SON), à partir des données E-OBS, GPCP, NCEP-R1, NCEP-R2, ERA-Interim, MRCC5,	

CanRCM4-044 et CanRCM4-022, sur les trois sous-régions du Maghreb (côtes atlantiques, côtes méditerranéennes Ouest, côtes méditerranéennes Est, panneaux du haut en bas, respectivement).	61
2.9 Idem à la figure 2.8, mais durant l'hiver (DJF).....	62
2.10 Box-plot spatio-temporel des indices climatologiques (Prcp1, CDD, SDII et Prec90p) à partir des données E-OBS (1), GPCP (2), NCEP-R1 (3), NCEP-R2 (4), ERA-Interim (5), MRCC5 (6), CanRCM4-044 (7) et CanRCM4-022 (8), sur les trois régions (côtes atlantiques, Côtes méditerranéennes Ouest, Côtes méditerranéennes Est), durant l'automne SON (panneaux du haut) et l'hiver DJF (panneaux du bas), durant la période 1998-2008.	63
2.11 Diagrammes de Taylor spatio-temporel des indices climatologiques de précipitations (Prccp1, CDD, SDII et Prec90p) des données E-OBS, GPCP, NCEP-R1, NCEP-R2, ERA-Interim, MRCC5, CanRCM4-044 et CanRCM4-022, sur la période 1998-2008, durant l'automne (SON), sur la région des côtes atlantiques.	64
2.12 Idem à la figure 2.11, mais durant la saison d'hiver (DJF).....	65
2.13 Idem à la figure 2.11 mais pour la région des côtes méditerranéennes Ouest.	66
2.14 Idem à la figure 2.13, mais durant la saison d'hiver (DJF).....	67
2.15 Idem à la figure 2.11, mais pour la région des côtes méditerranéennes Est	68
2.16 Idem à la figure 2.15, mais durant la saison d'hiver (DJF).....	69
2.17 Corrélations temporelles utilisant les méthodes de (Spearman, Kendall et Pearson) entre les indices de précipitations (Prec Tot, Prcp1 et CDD) (couleur grise : les corrélations non significatives) calculés à partir des données de précipitations quotidiennes d'E-OBS, MRCC5, CanRCM4-044 et CanRCM4-022, et l'indice ONA ou les caractéristiques des tempêtes (Densité, Vitesse, Circulation et Intensité) durant l'automne (SON) sur la période 1998-2008, selon les régions (A : Côtes Atlantiques, B : Côtes Méditerranéenne Ouest B : Côtes Méditerranéenne Est définies à la figure 2.1 (panneau b).....	70
2.18 Idem à la figure 2.17, mais pour les indices de précipitations (SDII et Prec90p).	71
2.19 Idem à la figure 2.17, mais durant la saison d'hiver (DJF).....	72
2.20 Idem à la figure 2.17, mais pour les indices de précipitations (SDII et Prec90p) et durant la saison d'hiver (DJF).....	73

2.21	Corrélations de (Spearman, Kendall et Pearson) entre les indices de précipitations (Prcp1, CDD, SDII et Prec90p, définies au tableau 2.3) et l'indice ONA ou les caractéristiques des tempêtes (Densité, Vitesse, Circulation et Intensité) en SON sur toute la période 1979-2012, pour les observations E-OBS, selon les trois régions définies à la figure 2.1.	74
2.22	Idem à la figure 2.21, mais pour la saison d'hiver (DJF).....	75
B.1	Température moyenne mensuelle de surface de la mer (en °C) durant les mois de janvier (panneau du haut) et de juillet (panneau du bas), valeur climatologique calculée sur la période 1971-2000 à partir de données Reynolds et Smith OISST Version 2. (Source : http://iridl.ldeo.columbia.edu/maproom/Global/Climatologies/SST_Loop.html?box=bb:-20:-40:55:40:bb&T=Aug)	85
B.2	Température moyenne saisonnière (en °C) au Maghreb en hiver (DJF) et été (JJA), valeur climatologique calculée sur la période 1971-2000 à partir des données du CRU (Climate Research Unit, Source : http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/hrg/).	86
B.3	Précipitation annuelle moyenne (en mm) au Maghreb, valeur climatologique calculée sur la période 1971-2000 à partir des données du CRU (Climate Research Unit, Source : http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/hrg/).	87
B.4	Climatogramme des précipitations (en mm) et températures moyennes (en °C) mensuelles (moyennes calculées sur la période 1971-2000) pour les trois pays du Maghreb : A : Algérie, B : Tunisie, et C : Maroc (Source : www.weatheronline.co.uk , consulté le 15-03-2013). Les valeurs en orange et en vert pour chaque mois (haut et bas de chaque graphique) correspondent aux nombres d'heures d'ensoleillement (en heures) et à l'humidité relative (en %) moyennes mensuelles.....	88
B.5	Corrélations de Spearman entre les anomalies de l'indice ONA (Oscillation Nord-Atlantique) et celles du champ de pression au niveau moyen de la mer pour le mois de décembre pour l'ensemble de l'Atlantique Nord, en utilisant les réanalyses NCEP/DOE sur la période 1979-2011 (gracieuseté de Rabah Aider). 89	
D.1	Variabilités interannuelles des anomalies pour les cumuls de précipitations et les densités des tempêtes sur les trois régions du Maghreb, durant les saisons (Automne et Hiver), sur la période 1979-2012.	95
D.2	Variabilités interannuelles des anomalies pour l'ONA et les densités des tempêtes sur le Maghreb, durant la saison d'automne (SON), sur la période 1979-2012...	96

D.3 Idem pour la figure D.2, mais pour la saison d'hiver (DJF).	97
D.4 Variabilités interannuelles des anomalies pour l'oscillation Nord-Atlantique et les cumuls de précipitations sur les côtes atlantiques, durant les deux saisons (Automne et Hiver), sur la période 1979-2012.	98
D.5 Variabilités interannuelles des anomalies pour l'oscillation Nord-Atlantique et les cumuls de précipitations sur les côtes méditerranéennes Ouest, durant les deux saisons (Automne et Hiver), sur la période 1979-2012.	99
D.6 Variabilités interannuelles des anomalies de l'oscillation Nord-Atlantique et les cumuls de précipitations sur les côtes méditerranéennes Est, durant les deux saisons (Automne et Hiver), sur la période 1979-2012.	100

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
2.1 Les principales caractéristiques des deux modèles MRCC5 et CanRCM4 et leurs configurations vis-à-vis des simulations utilisées dans le cadre de CORDEX-Afrique.	29
2.2 Descriptions et références des données observées et réanalyses utilisées.	30
2.3 Indices climatiques de précipitations utilisés pour caractériser l'occurrence, l'intensité, et la durée des données quotidiennes de précipitations.....	32
2.4 Variables des tempêtes utilisées et leurs définitions.	33
A.1 Contexte socio-économique au Maghreb. (Source : Statistiques mondiales, cf. www.statistiques-mondiales.com).	83
B.1 Précipitation moyenne annuelle et intervalle de variation de celle-ci dans les trois pays du Maghreb, établis sur la période de 1961 à 2000 (Source : Filali, 2004)..	89
C.1 Quelques exemples d'aléas hydrométéorologiques majeurs en Tunisie de 1980 à 2012.....	90
C.2 Les quantités de pluie enregistrées dans toutes les régions en millimètre durant 24 h le 30 octobre 2011; (http://www.meteo.tn/htmlfr/accueil.php)	91
C.3 Les quantités de pluie enregistrées dans toutes les régions [en millimètre] le 23 février 2012; (http://www.meteo.tn/htmlfr/accueil.php).....	92
C.4 Quelques exemples d'aléas hydrométéorologiques majeurs en Algérie de 2000 à 2012.....	92
C.6 Quelques exemples d'aléas hydrométéorologiques majeurs au Maroc de 1980 à 2012.....	94
D.1 Corrélations de Spearman, Kendall et Pearson entre les anomalies saisonnières (automne, SON, et hiver, DJF) de l'ONA et celles des caractéristiques des tempêtes (en termes de densité, vitesse de déplacement, circulation et intensité) durant la période 1979-2012, avec $\underline{X} = 99\%$, $\underline{X} = 95\%$ et $\underline{X} = 90\%$ avec ($X = 1 - p\text{-value}$)	101

LISTE DES ACRONYMES

CanRCM4	Modèle Régional Canadien du Climat (version 4) développé au CCmaC
CC	Changement climatique
CCmaC	Centre Canadien de modélisation et d'analyse Climatique
CDD	Nombre maximal de jours secs consécutif (précipitation < 1 mm/jour)
Centre ESCER	Centre pour l'Étude et la Simulation du Climat à l'Échelle Régionale
CEPMMT	Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme
CLASS 3.5	Canadian land-surface scheme : version 3.5
CLASS 2.7	Canadian land-surface scheme : version 2.7
CMIP3	Coupled Model Intercomparison Project Phase 3
CMIP5	Coupled Model Intercomparison Project Phase 5
CO ₂	Dioxyde de carbone
CORDEX	COordinated Regional Climate Downscaling Experiment
CRU	Climatic Research Unit
DJF	Décembre - Janvier - Février
DOE	US Department Of Energy
EC	Environnement Canada
E-OBS	ENSEMBLES-observational dataset
ERA-Interim	European Centre for Medium-range Weather Forecasting
ETCCDMI	Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices
FACE	Faire face Aux Changements Ensemble
FEM	Fonds pour l'Environnement Mondial
GEM	Global Environmental Multi-Scale Model
GES	Gaz à Effet de Serre
GMS	Geostationary Meteorological Satellite
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
GPCP	Global Precipitation Climatology Project
GSPDC	Geostationary Satellite Precipitation Data Center
IDRC	International Development Research Centre
IPCC/GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

IRIACC	International Research Initiative on Adaptation to Climate Change
MCG	Modèle Climatique Global
MRC	Modèle Régional du Climat
MRCC5	Modèle Régional Canadien du Climat (version 5) développé à ESCER/UQAM
NARCCAP	North American Regional Climate Change Assessment Program
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NSERC	National Sciences and Engineering Research Council of Canada
ONA	Oscillation Nord-Atlantique
OSS	Observatoire du Sahara et du Sahel
PIB	Produit Intérieur Brut
PMRC	Programme Mondial de Recherche sur le Climat
PNUD	Programme des Nations Unies pour le Développement
Prcp1	Fréquence du nombre de jours avec précipitations (seuil ≥ 1 mm/jour)
PrecTOT	Précipitation totale (cumuls mensuels ou saisonniers)
Prec90pc	90 ^e centile de précipitations quotidiennes
RPN	Recherche en Prévision Numérique
SDII	Intensité moyenne de précipitations par jours humides (seuil ≥ 1 mm/jour)
SLP	Sea Level Pressure
SON	Septembre - Octobre - Novembre
SSHRC	Social Sciences and Humanities Research Council of Canada
SST	Sea Surface Temperature
STARDEX	STATistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European regions
TSM	Température de Surface de la mer
UQAM	Université du Québec À Montréal

RÉSUMÉ

Une évaluation des simulations des deux modèles régionaux du climat (MRC) sur le domaine CORDEX-Afrique (pilotees par les réanalyses ERA-Interim) a été réalisée sur le Maghreb (Maroc, Algérie et Tunisie). Celle-ci a été effectuée à partir des deux plus récentes MRCs canadiens, le Modèle Régional Canadien du Climat version 5 (MRCC5) développé par l'UQAM/ESCER et le Modèle Régional Canadien du Climat version 4 (CanRCM4) développé par Environnement Canada. Une simulation du MRCC5 avec une résolution de $0,44^\circ$ et deux simulations du CanRCM4 avec deux résolutions de $0,44^\circ$ et de $0,22^\circ$ ont été utilisées. Ces trois simulations sont comparées avec les observations (les données E-OBS et GPCP) et trois réanalyses (Era-Interim, NCEP-NCAR et NCEP-DOE). L'évaluation du régime de précipitations concerne l'occurrence, la durée et l'intensité des précipitations et des séquences sèches au Maghreb, à partir de l'utilisation d'indices de précipitations quotidiennes calculés à partir des différences sources de données. Les liens entre l'indice d'oscillation Nord-Atlantique (ONA), les tempêtes et ces indices climatiques ont également été analysés sur la période commune de 1998-2008.

Durant les deux saisons pluviales (automne et hiver), le MRCC5 reproduit relativement bien la fréquence et l'intensité des précipitations extrêmes ainsi que l'occurrence des jours de pluie, tandis que le CanRCM4 sous-estime généralement les extrêmes de précipitation. L'analyse des liens entre les tempêtes et le régime des précipitations montre que l'occurrence et l'intensité des précipitations augmentent avec l'augmentation de la fréquence des tempêtes, mais ce lien s'affaiblit en direction des côtes méditerranéennes, en automne. Par contre, en hiver, ces liens augmentent vers l'Est, des côtes atlantiques vers les côtes méditerranéennes. L'analyse des liens entre l'ONA et le régime des précipitations montre que la diminution de l'indice de l'ONA est statistiquement liée à l'augmentation de la fréquence de précipitations sur les côtes méditerranéennes du Maghreb, durant l'hiver. Par contre, en automne, la diminution de l'indice ONA est associée à l'augmentation de l'intensité de précipitations sur la côte atlantique. Ces liens entre l'ONA et la précipitation sont le plus souvent bien reproduits par les deux MRCs, par rapport aux observations disponibles.

Mots-clés : Maghreb, occurrence, durée, et intensité de précipitations, extrêmes, variabilité, MRCC5, CanRCM4, oscillation Nord-Atlantique, CORDEX, tempêtes.

INTRODUCTION

Situés pour une large part dans une région climatique aride à semi-aride, les pays du Maghreb (Maroc, Algérie et Tunisie) sont régulièrement confrontés à une crise hydraulique majeure (Gana et El Amrani, 2006). Au cours des trois dernières décennies, le Maghreb a connu une raréfaction des ressources en eau (Gana et El Amrani, 2006 ; Thivet et Blinda, 2009). Ainsi, les pays du Maghreb souffrent régulièrement de stress hydrique (moins de 1000 m³/hab./an), en particulier l'Algérie et la Tunisie (Agoumi, 2003). Cette crise se manifeste, d'une part par la raréfaction et la dégradation de la ressource en eau, et d'autre part, par une compétition croissante entre les divers usages de l'eau (agricole, touristique, industriel et domestique). En effet, les ressources hydriques sont principalement utilisées pour l'agriculture (80 %), l'eau potable (13 %) et dans le domaine industriel (7 %) (cf. Agoumi, 2003).

L'économie des pays du Maghreb est très dépendante de l'agriculture, principalement non irriguée (celle-ci dépend des saisons pluviales). En effet, le secteur agricole représente 15 % du Produit Intérieur Brut (PIB) alors que le pourcentage d'emploi dans ce secteur est de 40 % au Maroc, 17 % en Tunisie et 11 % en Algérie (La Banque Mondiale, 2011). De plus, les terres agricoles représentent 50 % de la superficie du Maghreb (ESPERE climate encyclopaedia, 2006). L'agriculture non irriguée en Afrique du Nord, qui représente 50 % de l'agriculture totale, est fortement dépendante des précipitations hivernales et notamment du cumul de précipitations totales, et de la fréquence des jours de pluie durant cette saison

(Thivet et Blinda, 2009 ; Born et al., 2008 ; Driouech et al., 2010 ; Abouabdillah et al., 2010 ; García-Ruiz et al., 2011). Cependant, ce secteur, limité par les ressources hydriques disponibles, est marqué par de grandes fluctuations dans la production et les rendements en raison de la variabilité de régime de précipitation, tant au niveau intra-annuel qu'à l'échelle interannuelle.

Au Maghreb, les précipitations sont caractérisées par une grande variabilité temporelle (intra-annuelle et interannuelle) et spatiale (Djellouli, 1990 ; Agoumi, 2003 ; Lionello, 2012). En effet, selon Agoumi (2003), durant les saisons pluviales (automne et hiver), les précipitations au Maghreb sont souvent plus intenses et de courtes durées (plus de 100 mm/jour dans des zones de relief ou des régions arides) suivies d'une absence quasi totale le reste de l'année. Cette forte variabilité temporelle des précipitations est à l'origine soit de nombreuses sécheresses, soit d'inondations majeures (entre septembre à avril) (cf. Agoumi, 2003 ; IPCC, 2007 b, 2013 et 2014).

Dans les régions côtières du Maghreb, une grande partie des précipitations annuelles peut s'accumuler en quelques jours, conduisant toujours à des inondations majeures (Agoumi, 2003 ; Fehri, 2014). Au cours des trois dernières décennies, le Maghreb a subi une augmentation dans l'occurrence des inondations en raison notamment de la présence d'années particulièrement humides (même si très rares) où les précipitations sont très intenses avec de courtes durées (cf. IPCC, 2007b, 2013 et 2014 ; Agoumi, 2003 ; Tabet-Aoul, 2010 ; Fehri, 2014).

En plus des inondations, le Maghreb est également confronté à des sécheresses qui touchent en particulier le centre et le Nord de la région et qui sont de plus en plus fréquentes (Esper et al., 2007 ; OSS, 2013). Cette zone est caractérisée maintenant par cinq à six années de sécheresses chaque dix ans au cours des quatre dernières décennies, alors qu'au début du 20^e siècle on enregistrait seulement une

seule année de sécheresse chaque dix ans (Filali, 2004). Dans ce contexte, les impacts de la diminution des précipitations sur l'environnement naturel de la région amplifient les pressions liées aux activités humaines déjà existantes. L'augmentation récente de la température affecte également le cycle de l'eau, en accroissant notamment l'évapotranspiration potentielle affectant ainsi le stress hydrique (Karsili, 2013). En Algérie, les conséquences sont d'autant plus graves lorsque cette augmentation de la température se combine à une diminution de la précipitation, accroissant le stress hydrique et la chute des rendements agricoles, notamment au cours des années 2002 à 2005 (Medejerab, 2009). Ces fluctuations récentes du climat au Maghreb et la raréfaction des ressources hydriques ont donc favorisé l'occurrence régulière d'aléas hydrométéorologiques majeurs, notamment une augmentation importante de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes comme les sécheresses et les inondations (IPCC, 2014a).

Le changement climatique en cours et à venir représente une véritable menace pour le développement socio-économique du Maghreb (Agoumi, 2003 ; Tabet-Aoul, 2010). En effet, dans une région comme le Maghreb, l'élévation des températures et la modification du régime de précipitations (dus aux changements climatiques) vont augmenter les risques de stress hydrique, favoriser la baisse des rendements agricoles et l'augmentation de la superficie des terres arides et semi-arides, les inondations et les intrusions salines près des côtes en raison notamment de l'élévation du niveau marin (IPCC 2007 ; IPCC, 2014a ; Tabet-Aoul, 2010). Selon les projections disponibles des changements climatiques appréhendés (IPCC, 2014a), cette région sera exposée à une aggravation des catastrophes naturelles durant les prochaines décennies. Compte tenu du contexte climatique actuel et des changements climatiques appréhendés ainsi que les différentes problématiques liées aux ressources en eau des pays du Maghreb évoquées ci-dessus, il s'avère essentiel d'analyser comment les modèles climatiques d'échelle régionale représentent le régime de précipitations pour

cette région, et la distribution des événements ou des séquences humides et sèches dans le temps et dans l'espace.

D'après la littérature disponible sur le sujet (cf. chapitre I), peu d'études scientifiques se sont intéressées aux simulations des précipitations à partir des modèles régionaux du climat (MRC) au Maghreb. De ce fait, l'objectif général de la présente étude est d'utiliser des simulations des MRCs issues du projet COordinated Regional Climate Downscaling EXperiment (CORDEX), afin d'évaluer l'occurrence, l'intensité, et la durée des précipitations modérées et extrêmes, ainsi que d'analyser l'occurrence des séquences sèches dans la partie centrale du Maghreb (Maroc, Algérie, Tunisie). La présente étude s'inscrit dans le cadre du projet CORDEX, qui est une initiative du Programme Mondial de Recherche sur le Climat (PMRC; <http://www.wcrp-climate.org/>) visant principalement à évaluer et à vérifier l'efficacité des MRCs, et concevoir une série d'expériences destinées à obtenir des projections climatiques pouvant servir aux études d'impact et d'adaptation. Dans notre cas, les précipitations journalières simulées par les deux dernières versions du modèle régional Canadien du climat qui participe au projet CORDEX, soit le Modèle Régional Canadien du Climat version 5 (MRCC5, développé par le Centre ESCER à l'UQAM) et Modèle Régional Canadien du Climat version 4 (CanRCM4 développé par Environnement Canada). Ces séries de simulations de deux MRCs sont réalisées sur le domaine CORDEX-Afrique (pilotées par les réanalyses ERA-Interim). Notre étude complète celle de Diaconescu et al. (2014) qui a effectué cette évaluation sur la région du Sahel à partir des deux mêmes séries de simulations (du MRCC5 et du CanRCM4).

Cette étude s'inscrit également dans le cadre du projet FACE (Faire face aux changements ensemble), un programme canadien de recherche en adaptation aux CC. Ce travail a comme objectifs spécifiques :

1. Évaluer la performance des MRCs sur la fenêtre Nord-Africaine;
2. Caractériser et analyser les précipitations au Maghreb à partir des observations et des simulations des MRCs disponibles;
3. Analyser l'occurrence, la durée et l'intensité de précipitations au Maghreb à partir des observations et des simulations des MRCs disponibles;
4. Déterminer les liens entre le régime de précipitations et la variabilité de la circulation atmosphérique de grande échelle (tempêtes et l'oscillation Nord-Atlantique);

La démarche générale adoptée est d'évaluer des simulations de deux MRCs décrites précédemment (pilotes en mode réanalyses) sur la zone du Maghreb, en les comparant avec deux séries d'observations (issues du projet ENSEMBLES ; E-OBS, et du Global Precipitation Climatology Project ; GPCP) et trois séries de réanalyses (European Centre for Medium-range Weather Forecasting ; ERA-Interim, National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research ; NCEP-NCAR et National Centers for Environmental Prediction/Department of Energy ; NCEP-DOE). L'évaluation du régime de précipitations concerne l'occurrence, la durée et l'intensité des précipitations et des séquences sèches dans différentes régions du Maghreb, à partir de l'utilisation d'indices de précipitations quotidiennes calculés avec les différentes sources de données. La méthodologie utilisée dans ce projet est décrite en détail dans le chapitre 2.

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur le climat moyen, la variabilité climatique, les extrêmes climatiques ainsi que les mécanismes atmosphériques et océaniques à l'origine de la fluctuation spatio-temporelle des précipitations au Maghreb. Dans ce chapitre, les différents indices de précipitations utilisés sont décrits, ainsi qu'un aperçu général des forces et des faiblesses des MRCs,

et un bref aperçu des changements anticipés au cours du 21^e siècle dans la région du Maghreb. Dans le chapitre II, une évaluation de l'occurrence, de la durée et de l'intensité des précipitations au Maghreb, à partir des simulations du MRCC5 (une simulation utilisant une résolution horizontale de 0,44°) et du CanRCM4 (deux simulations utilisant deux résolutions horizontales de 0,22 et 0,44°) a été réalisée. Ce chapitre est présenté sous forme d'un article scientifique. Les principales conclusions sont présentées dans la dernière section du mémoire.

L'annexe A complète cette introduction et présente le contexte socio-économique du Maghreb, sous forme d'un tableau indiquant la superficie, la démographie et les pourcentages de PIB pour les différents secteurs économiques, pour chacun des trois pays.

L'annexe B présente le contexte climatologique du Maghreb : les caractéristiques du climat moyen de ces trois pays en détail. L'annexe C aborde des exemples d'effets des aléas hydrométéorologiques au Maghreb. Ces deux annexes (B et C) complètent la revue de littérature sur le sujet (Chapitre 1).

Un travail supplémentaire est présenté dans l'annexe D et consiste à analyser les liens entre les tempêtes, ONA et la précipitation au Maghreb sur la période 1979-2012.

CHAPITRE I

REVUE DE LA LITTÉRATURE

La première section concerne la présentation du contexte climatique du Maghreb en termes de connaissances scientifiques sur le climat moyen, la variabilité historique, les extrêmes climatiques et les mécanismes atmosphériques et océaniques à l'origine des précipitations. La deuxième section présente les indices de précipitations utilisés et leurs définitions. La troisième section présente les forces et les faiblesses des MRCs, notamment vis-à-vis de la simulation des extrêmes de précipitations. La dernière section présente un bref aperçu des changements anticipés au cours du 21^e siècle en utilisant les modèles climatiques globaux (MCGs) et les MRCs, en Afrique du Nord.

1.1 Contexte climatique du Maghreb

1.1.1 Climat moyen au Maghreb

Le climat au Maghreb est caractérisé par une grande diversité avec un climat aride à semi-aride au Sud, océanique dans la partie Ouest et méditerranéen dans la partie Nord. Cette diversité est fonction des facteurs physiographiques, thermodynamiques et dynamiques suivants :

- La localisation géographique du Maghreb et son étendue en longitude et latitude entre 18° N et 42° N ; 20° W et 16° E. (Figure 1.1).
- La présence de chaînes montagneuses dépassant les 4 000 m au Nord et à l'Ouest et la présence de zone désertique au Sud (Sahara). L'influence

maritime à l'Est (mer Méditerranée) et à l'Ouest (Océan Atlantique) avec des températures de surface de la mer (TSM) qui augmentent d'Ouest en Est. (cf. Annexe B, Figure B.1)

- La présence pendant une partie de l'année de la cellule de Hadley et sa migration qui favorise la présence d'une saison sèche en été (branche descendante de la cellule de haute pression de Hadley) et en hiver (branche ascendante de la cellule de Hadley ; cf. Peixoto et Oort, 1992 ; Dima et Wallace, 2003).
- La présence des perturbations venant de l'Atlantique et de la Méditerranée qui favorisent la présence d'une saison humide de septembre à avril.

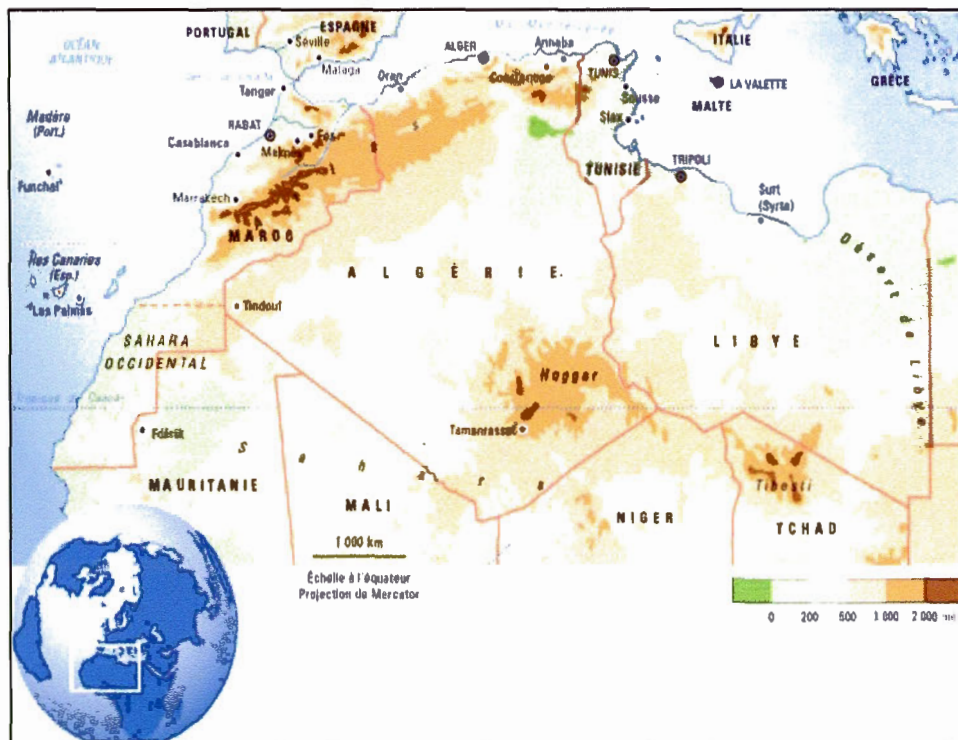


Figure 1.1 Carte de la région d'étude. (Source : http://cartographie.sciences-po.fr/sites/default/fuiles/10_maghreb_physique)

La combinaison de ces facteurs engendre une variabilité spatiale et temporelle importante du régime de précipitations, et dans une moindre mesure du régime de température au cours de l'année et d'une année à l'autre.

Les températures moyennes saisonnières varient de 0 à 15 °C en hiver (décembre-janvier-février). En été (juin-juillet-août), celles-ci dépassent les 30 °C dans le Sud du Maghreb (vers le Sahara), et sont comprises entre 20 et 25 °C en moyenne le long du littoral au Nord de la région (cf. Annexe B, Figure B.2). Ceci est lié à l'absence de précipitations durant la saison estivale au Maghreb (cf. Annexe B, Figure B.4), et aux advections fréquentes de masses d'air chaudes venant du Sahara, favorisant une forte évapotranspiration et un assèchement progressif de la surface (variant selon la région ; cf. Annexe B, Figure B.2, Figure B.4).

Le régime de précipitations au Maghreb varie fortement du Sud vers le Nord et d'Ouest en Est (cf. Annexe B, Figure B.3), les précipitations sont le plus souvent intenses et d'une durée très courte (Le Houerou et al, 1979 ; Djellouli, 1990 ; Xoplaki, 2002 ; Mariotti et Struglia, 2002 ; Eshel et Farrell, 2000 ; Eshel et al., 2000 ; Eshel, 2002 ; Dünkeloh, et Jacobeit, 2003). Cette région est caractérisée par l'alternance de deux périodes durant l'année : une période sèche estivale plus ou moins longue, s'étalant entre le mois de mai à août (voire quasi continue sur toute l'année dans les régions désertiques du Sud), suivie d'une période humide de septembre à avril (cf. Annexe B, Figure B.4). Au Maghreb, les saisons automnales (septembre-octobre-novembre) et hivernales (décembre-janvier-février), sont celles qui connaissent les accumulations de précipitations mensuelles les plus significatives (cf. Annexe B, Figure B.4). En général, les accumulations de précipitations restent limitées sur toute la région (surtout plus au Sud), avec un nombre de jours d'occurrence de pluie très limitée (moins de 50 jours par année en moyenne) et des périodes de sécheresse très fréquentes dont la durée peut être de plusieurs années consécutives (IPCC, 2014a).

1.1.2 Variabilité historique et extrêmes climatiques

1.1.2.1 Température

Durant les trois dernières décennies, l'augmentation de la température annuelle (maximale ou minimale) a été significative au Maghreb (Giannakopoulos et al, 2005 ; Cook et Vizy, 2012). Au cours de cette période, les tendances annuelles et saisonnières observées de la température moyenne en Afrique du Nord indiquent un réchauffement généralisé, dû à la variabilité naturelle dans cette région (Barkhordarian et al., 2012a). Par ailleurs, la température moyenne en surface augmente durant les saisons printanière et estivale dans la région du Nord du Maghreb (Barkhordarian et al., 2012b). L'élévation de la température moyenne de l'air et une plus forte occurrence des événements de chaleur extrême ont été plus fréquentes ces trois dernières décennies au Maghreb (Giannakopoulos et al., 2005 ; IPCC, 2014a).

1.1.2.2 Précipitation

Au cours du dernier siècle, la précipitation annuelle moyenne au Maghreb a diminué (IPCC, 2014a). En particulier, au cours des trois dernières décennies (1979–2008), les régions du Nord du Maghreb (le Nord des montagnes de l'Atlas et les Côtes méditerranéennes) ont connu une forte diminution de la quantité des précipitations reçue en hiver et au début du printemps (Barkhordarian et al., 2013). Cependant, en automne, l'analyse des données observées révèle une augmentation significative des précipitations dans certaines régions du Nord de l'Algérie et du Maroc (Barkhordarian et al., 2013). En général, le nombre estimé de jours secs a été le plus souvent supérieur à 330 jours par année (moins de 1 mm de pluie/jour), au Maghreb, entre 1997 et 2008 (Cook et Vizy, 2012). Même si le Maghreb a enregistré une diminution de précipitations ces trois dernières décennies, il a aussi connu quelques événements de précipitations exceptionnels (cf. Annexe C) qui ont conduit à

de graves catastrophes naturelles (Agoumi, 2003 ; Daoud et Dahech, 2012 ; Daoud, 2013). Dans l'annexe C, les tableaux 4 et 5 présentent des quantités de pluie (en mm) extrêmes enregistrées durant la saison d'hiver (ex. mars 2011 et en février 2012 en Tunisie).

1.1.3 Mécanismes atmosphériques et influences des anomalies de la TSM sur la variabilité de la précipitation

Plusieurs facteurs atmosphériques ou océaniques, reliés ou non aux téléconnexions issues de l'Atlantique, ont été proposés pour expliquer la variabilité interannuelle des précipitations en Afrique du Nord ou sur l'Ouest du bassin méditerranéen. Parmi ceux-ci l'Oscillation Nord-Atlantique (ONA), qui est basée sur la différence de pression au niveau moyen de la mer (SLP) normalisée entre Lisbonne, au Portugal, et Stykkisholmur/Reykjavik, en Islande (Hurrell, 1995), et les modifications dans les caractéristiques des tempêtes au-dessus de la région méditerranéenne ont été le plus souvent évoquée (Toreti et al., 2010). Certaines études (Lamb et Pepler, 1987 ; Lamb et al., 1997 ; Portis et al., 2001 ; Matti et al., 2009 ; Xoplaki, 2002) ont révélé que les phases positives/négatives de l'ONA sont liées à une diminution/augmentation des quantités de précipitations observées au Maghreb. L'étude de Belaassal (1998) a permis de démontrer que l'indice ONA joue un rôle plus ou moins important dans la variabilité des précipitations marocaines hivernales observées entre 1980 et 1989. Par contre, Barkhordarian et al. (2013) concluent que la sécheresse observée au Maghreb ne peut pas être attribuée à une variation observée du comportement de l'ONA, durant la saison hivernale si on tient compte de l'ensemble de la période de 1979 à 2008. Ces résultats sont aussi corroborés par l'étude de Hoerling et al. (2012) qui suggère que le comportement de l'indice ONA n'a pas affecté l'évolution temporelle des précipitations méditerranéennes observées de novembre à avril durant la période de 1971 à 2010. Par contre, Hoerling et al. (2012) suggèrent qu'un réchauffement global uniforme

ainsi qu'un réchauffement différentiel, qu'il soit méridien (aux tropiques versus aux moyennes latitudes) ou zonal (de l'Océan Indien versus l'Océan Pacifique), de la température de surface de la mer (TSM) peut conduire à une plus grande sécheresse à l'Ouest de la méditerranée, pendant la saison humide (novembre-avril). Par ailleurs, l'étude de Martin-Vide et Lopez-Bustins (2006) suggère que l'oscillation Ouest méditerranéenne (WeMO : Western Mediterranean Oscillation), calculée à partir de la différence de pression au niveau moyen de la mer entre l'anticyclone des Açores (situé dans l'Océan Atlantique Nord, à environ 1 500 km à l'Ouest de Lisbonne) et la dépression de Ligurie (située en Italie le long des côtes du Golfe de Gênes), détermine en partie les anomalies de précipitations mensuelles dans la région du Maghreb.

1.2 Indices de précipitation (extrêmes et variabilité)

Pour étudier la variabilité et les extrêmes de précipitation, des indices de précipitations ont été développés, à partir des valeurs de précipitations quotidiennes. La plupart de ces indices ont été développés et définis dans le cadre du groupe Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices (ETCCDMI ; cf. International CLIVAR Project Office, 2003) et du projet européen Statistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European regions (STARDEX ; cf. Goodess et al., 2003). Dans notre cas, ces indices sont utilisés afin d'évaluer l'occurrence, l'intensité, et la durée des précipitations modérées et extrêmes, ainsi que d'analyser l'occurrence des séquences sèches, étant donné que les fluctuations du régime de précipitations au Maghreb sont essentiellement associées aux modifications dans la distribution des événements persistants ou intermittents de pluie (intense) ou d'absence de pluie à l'échelle intra-annuelle et interannuelle. Ces indices ont souvent été utilisés en Europe (ex. Schmidli et al., 2007 ; van der Linden and Mitchell, 2009), au Québec (Gachon et al., 2005 ; Roy et al., 2012) et dans la région du Sahel en

Afrique de l'Ouest (Gachon et al., 2007 ; Diaconescu et al., 2014) ou dans d'autres régions du monde (cf. Alexander et al., 2006).

1.3 Modèles Régionaux du Climat

Les modèles MRCs ont une capacité à représenter les processus atmosphériques à méso-échelle et une meilleure prise en compte des processus de sous-échelle non résolus dans les MCGs, donc, l'utilisation de ces modèles est nécessaire afin de simuler adéquatement les extrêmes de précipitations. En effet, les MCGs constituent un outil de base afin d'obtenir les informations climatiques à l'échelle globale ou continentale. Cependant, leur résolution spatiale grossière (d'environ 400 km) ne permet pas d'obtenir des informations fiables à des échelles plus fines. Contrairement aux MCGs, les MRCs ne couvrent qu'une région du globe (cf. Mearns et al., 2003), mais à plus haute résolution que les MCGs. De ce fait, les MRCs représentent des outils importants pour simuler adéquatement les effets avec une résolution spatiale plus fine (e.g., <50 km). Les MRCs fournissent une information sur la fréquence et l'intensité des événements extrêmes à des échelles temporelles et spatiales plus fines que celles fournies par les MCGs, alors les processus de sous-échelles, en plus des effets des conditions de grande échelle (via la circulation atmosphérique), sont parmi les facteurs qui influencent le régime de précipitations extrême. En général, les simulations des MRCs ont une meilleure capacité à reproduire les précipitations quotidiennes observées à l'échelle régionale que les MCGs (Roy et al., 2012). Cependant, les MRCs ont une tendance générale à sous-estimer les précipitations extrêmes, notamment en zones tropicales ou subtropicales (Diaconescu et al., 2014).

1.4 Les changements anticipés au cours du 21^e siècle

En raison de son contexte climatique et hydrique particulier, le Maghreb sera particulièrement affecté par les changements climatiques par rapport aux autres

régions du monde au cours du 21^e siècle, en particulier en raison de l'augmentation potentielle des événements extrêmes (les inondations et la sécheresse ; cf. IPCC, 2014a ; Giorgi, 2006). En effet, les projections des modèles climatiques globaux, à la fin du 21^e siècle, par rapport à la période 1985-2005, suggèrent que la température moyenne annuelle pourrait augmenter de 4 °C, et que les précipitations moyennes annuelles pourraient être réduites de 20 %, dans la région du Maghreb (cf. IPCC, 2014). De plus, d'autres études à partir des simulations de MCGs suggèrent également une réduction générale des précipitations au Maghreb favorisant très probablement une augmentation de l'occurrence et la sévérité des sécheresses d'ici la fin du 21^e siècle (Giorgi et Bi, 2005a ; Giorgi et Lionello, 2008 ; Barkhordarian et al., 2013 ; IPCC, 2014a). Les MRCs ont été utilisés sur la région Méditerranéenne (Lionello et Giorgi, 2007 ; Gao et Giorgi, 2008 ; Paeth et al, 2009 ; Patricola et Cook, 2010), et les simulations de celle-ci ont permis de prévoir également une diminution du régime de précipitations vers le 21^e siècle. Concernant notre région, les études des simulations des MRCs qui se sont intéressées à étudier l'occurrence, la durée et l'intensité des précipitations quotidiennes du climat actuel ou futur sont peu nombreuses, voire inexistantes.

CHAPITRE II

ÉVALUATION DU RÉGIME DE PRÉCIPITATION AU MAGHREB TEL QUE SIMULÉ PAR LES MODÈLES RÉGIONAUX DU CLIMAT : OCCURRENCE, DURÉE ET INTENSITÉ DES PRÉCIPITATIONS QUOTIDIENNES

Mariam Jelassi^{1,*}, Philippe Gachon^{1,2}, René Laprise¹

¹ ESCER Centre, University of Quebec at Montreal (UQAM), Montréal (Québec)
H3C 3P8, Canada.

² Geography Department, University of Quebec at Montreal (UQAM), Montréal
(Québec) H3C 3P8, Canada.

*e-mail : jelassi.mariam@courrier.uqam.ca

Abstract

CORDEX-Africa simulations (driven by ERA-Interim) from the recent two versions of Canadian Regional Climate Models, CRCM5 and CanRCM4 developed respectively by UQAM/ESCER and EC/CCCma, are evaluated over the Maghreb area (i.e. Morocco, Algeria and Tunisia). The use of climatic indices of precipitation, has allowed us to analyze the occurrence, wet/dry spells, and the high intensity of daily precipitation in different regions, over the recent 1998-2008 period. The links between North Atlantic Oscillation (NAO) index, the storm activities over the Mediterranean area, and the precipitation indices are also analyzed with respect to various observed and reanalysis products.

During the rainy season (mainly from fall to the end of winter), the comparison between observed and simulated RCM values reveals that CRCM5 reproduces quite well the observed frequency and the intensity of precipitation extremes as well as the occurrence of wet days, while the CanRCM4 generally underestimates the precipitation extreme. The analysis of links between storms and the precipitation regime across various Maghreb regions exhibits that over the Atlantic coast, the precipitation (occurrence, intensity and wet periods) increases significantly with the frequency of storms in the fall, but this link decreases towards the Mediterranean coast. However, during winter, this link increases from the Atlantic to the Mediterranean coasts. In fall, the decrease in the NAO index is statistically linked with the increase of rainfall intensity and extremes, and the increase of accumulated precipitation, mainly along the Atlantic coast. This link is weaker over the Mediterranean coast. However, during winter, the decrease in the NAO index is statistically linked with the increase in the precipitation occurrence over the major part of the Maghreb Mediterranean coastlines. This link increases over the Atlantic coasts. These links between NAO and the precipitation is more often quite well reproduced by the two RCMs.

KeyWords: Maghreb, Precipitation extremes, regional climate models, CRCM5, CanRCM4, North Atlantic Oscillation, Synoptic storms, CORDEX simulations.

Résumé

Des simulations de CORDEX-Afrique (pilotees par ERA-Interim) à partir des deux plus récentes versions des modèles régionaux canadiens du climat, le Modèle Régional Canadien du Climat version 5 (MRCC5) et le Modèle Régional Canadien du Climat version 4 (CanRCM4) développés respectivement par l'UQAM/ESCER et EC/CCmaC, sont évaluées dans la région du Maghreb (Maroc, l'Algérie et la Tunisie). L'utilisation d'indices climatiques de précipitations nous a permis d'analyser l'occurrence, la durée et l'intensité des précipitations quotidiennes dans différentes régions, sur la période 1998-2008. Les liens entre l'indice d'oscillation Nord-Atlantique (ONA), les tempêtes sur la région méditerranéenne et les indices des précipitations sont également analysés par rapport aux divers produits observés et de réanalyses.

Pendant la saison des pluies (principalement en automne et en l'hiver), la comparaison entre les valeurs observées et simulées révèle que le MRCC5 reproduit assez bien la fréquence et l'intensité des précipitations extrêmes ainsi que l'occurrence des jours de pluie, tandis que le CanRCM4 sous-estime généralement les extrêmes de précipitation. L'analyse des liens entre les tempêtes et le régime de précipitations dans différentes régions du Maghreb montre que, sur la côte atlantique, la précipitation (occurrence, intensité et périodes humides) augmente de manière significative avec la fréquence des tempêtes, à l'automne, mais ce lien s'affaiblit sur les côtes méditerranéennes. Cependant, durant l'hiver, ces liens augmentent vers l'Est, depuis les côtes atlantiques vers les côtes méditerranéennes. La diminution de l'indice ONA, en automne, est statistiquement associée à l'augmentation de l'intensité et des extrêmes de précipitations, et à l'augmentation des cumuls pluvieux sur les côtes atlantiques. Ce lien est plus faible sur les côtes méditerranéennes. Cependant, lorsque l'indice ONA diminue en hiver, la fréquence des précipitations augmente sur les régions méditerranéennes. Ce lien est faible sur les côtes atlantiques. Ces liens entre l'indice ONA et précipitations sont le plus souvent assez bien reproduits par les deux MRCs.

Mots-clés : Maghreb, occurrence de précipitations, durée de précipitations, fréquence de précipitations, modèle régional de climat, extrêmes, variabilité, MRCC5, CanRCM4, Oscillation Nord-atlantique, CORDEX, tempêtes.

2.1 Introduction

Le Maghreb, situé au Nord-Ouest de l'Afrique et comprenant la Tunisie, l'Algérie, et le Maroc, est caractérisé par un contraste marqué dans le régime de précipitation, avec un climat aride à semi-aride au Sud, océanique dans la partie Ouest et méditerranéen dans la partie Nord, soit relativement humide dans ces deux dernières régions. En plus de cette forte variabilité spatiale, les précipitations dans l'ensemble du Maghreb varient fortement à l'échelle intra-annuelle et interannuelle (Djellouli, 1990 ; Agoumi, 2003 ; Lionello, 2012). Durant la période humide, s'étendant de septembre à avril en général, et correspondant à environ 90 % des précipitations totales annuelles, les pluies sont irrégulières, souvent intenses et de courte durée (Le Houerou et al., 1979 ; Djellouli, 1990 ; Xoplaki, 2002 ; Mariotti et Struglia, 2002 ; Eshel et Farrell, 2000 ; Eshel et al., 2000 ; Eshel, 2002 ; Dünkloh, et Jacobeit, 2003 ; Agoumi, 2003).

Cette forte variabilité du régime de précipitations influence les activités socio-économiques au Maghreb, en raison notamment du besoin élevé en ressources en eau dans divers secteurs, surtout en agriculture (80 % des ressources hydriques sont utilisées pour l'agriculture ; Agoumi, 2003). L'agriculture, qui est pour une large part d'origine pluviale (non irriguée), est largement dépendante des précipitations hivernales et notamment du cumul de précipitations totales, et de la fréquence des jours de pluie durant cette saison (Thivet et Blinda 2009 ; Born et al., 2008 ; Driouech et al., 2010 ; Abouabdillah et al., 2010 ; García-Ruiz et al., 2011). Les ressources hydriques disponibles constituent des facteurs limitant le développement et la production agricole. Ceci affecte donc l'économie de ces trois pays, notamment compte tenu de la variabilité importante du régime de précipitations dans cette région.

Au cours des trois dernières décennies, les sécheresses sont devenues de plus en plus fréquentes au Maghreb, accentuant le phénomène de désertification (avancée

du désert), la dégradation des terres agricoles et la nécessité de rallonger les trajets pour les humains et les animaux afin d'avoir accès à l'eau (Ward et al., 1999 ; Knippertz et al., 2003 ; Esper et al., 2007). Ceci est d'autant plus préoccupant que les pays du Maghreb ne sont pas autosuffisants d'un point de vue de la production agricole, qui devrait augmenter de 53 % pour permettre de nourrir toutes les populations de cette région (Blanc et Le Grusse, 2007). En dépit de la diminution des quantités cumulées de précipitation en hiver et au début du printemps, qui perturbe les activités économiques au Maghreb, des événements de fortes précipitations ont engendré des inondations majeures au cours des trois dernières décennies (IPCC, 2007b, 2013 et 2014a ; Agoumi, 2003 ; Tabet-Aoul, 2010 ; Fehri, 2014).

Le régime de précipitations de l'Afrique du Nord est influencé par certaines modes de variabilité de la circulation atmosphérique extratropicale, notamment l'Oscillation Nord-Atlantique (ONA) et la fluctuation dans le régime des systèmes dépressionnaires associée. Durant la période pluviale, il existe cinq types ou familles de trajectoires de dépressions atmosphériques impliquées dans la modification du régime de précipitations au Maghreb (Saïdi, 1977) : les dépressions venant du Nord-Ouest, du Nord, du Nord-Est, d'Ouest ou d'origine saharienne. Par exemple, les dépressions du Nord-Ouest, plus fréquentes dans cette région, sont accompagnées de pluies intenses et d'une durée très courte. L'indice ONA repose sur la différence de pression au niveau moyen de la mer (SLP) normalisée entre Lisbonne (Portugal) et Stykkisholmur /Reykjavik (Islande) (Hurrell, 1995). L'ONA a été reconnu comme étant un des mécanismes influençant le régime de précipitations au Maghreb. En effet, les phases négatives de cet indice sont généralement corrélées avec une augmentation des cumuls de précipitations au Maghreb (Lamb et Pepler, 1987 ; Lamb et al., 1997 ; Portis et al., 2001), notamment dans la majeure partie de l'Ouest de la Méditerranée (Xoplaki, 2002) et du Nord du Maroc (Matti et al., 2009). De plus, les variations de l'indice ONA ont été identifiées comme étant responsables des

variations de précipitations tout au long du 20^e siècle (Xoplaki et al., 2004).

L'Afrique du Nord sera tout particulièrement affectée par le changement climatique, notamment en raison de son contexte climatique et hydrique déjà profondément marqué par une raréfaction des ressources en eau (Iglesias et al., 2009). Des études établies à partir des modèles climatiques globaux (MCGs) suggèrent une réduction générale des précipitations au Maghreb, d'ici la fin du 21^e siècle, favorisant très probablement une augmentation de l'occurrence et la sévérité des sécheresses (Giorgi et Bi, 2005 ; Giorgi, 2006 ; Giorgi et Lionello, 2008 ; Barkhordarian et al., 2013). Les études sur le climat régional (Lionello et Giorgi, 2007 ; Gao et Giorgi, 2008 ; Paeth et al., 2009 ; Patricola et Cook, 2010) ont prévu également une diminution du régime de précipitations au cours du 21^e siècle, au Maghreb, selon les scénarios A1B et A2. Notamment, les projections futures de l'étude de Lionello et Giorgi (2007) montrent que les précipitations dans le Sud de la région méditerranéenne diminueront par rapport aux conditions climatiques actuelles.

Peu d'études scientifiques ont évalué l'occurrence, l'intensité, et la durée des précipitations modérées et extrêmes, ainsi que l'occurrence des séquences sèches dans la partie centrale du Maghreb (Maroc, Algérie et Tunisie), notamment à l'aide des simulations de MRCs. De ce fait, l'objectif général de la présente étude est d'utiliser des simulations de MRCs, issues du projet COordinated Regional Climate Downscaling EXperiment (CORDEX), qui est une initiative du Programme Mondial de Recherche sur le Climat (PMRC; <http://www.wcrp-climate.org/>), pour évaluer l'occurrence, l'intensité, et la durée des précipitations dans cette région. De ce fait, nous comparons les précipitations journalières simulées par les deux dernières versions du modèle régional Canadien du climat, le Modèle Régional Canadien du Climat version 5 (MRCC5) et le Modèle Régional Canadien du Climat version 4 (CanRCM4), sur le domaine CORDEX-Afrique (pilotés par les réanalyses ERA-Interim ; Figure 2.1). Cette étude complète l'étude de Diaconescu et al. (2014)

réalisée sur la région du Sahel, i.e. au Sud du Sahara (à l'aide des deux mêmes MRCs, i.e. le MRCC5 et le CanRCM4). La présente étude s'inscrit également dans le cadre du projet FACE (Faire face aux changements ensemble), un programme canadien de recherche en adaptation aux changements climatiques. Notre étude poursuit les principaux objectifs suivants : 1) Évaluer la performance des MRCs sur la fenêtre Nord-Africaine; 2) Analyser l'occurrence, la durée et l'intensité des précipitations au Maghreb; et 3) Caractériser les liens du régime de précipitations avec les téléconnexions à l'échelle synoptique dans cette région.

La suite de cet article est organisée comme suit. La présentation de la zone d'étude, la description des données utilisées et la méthodologie sont présentées dans la partie 2. La partie 3 présente les résultats et leurs interprétations, avec une analyse détaillée du régime de précipitations simulées durant les deux saisons pluviales d'automne et d'hiver, ainsi que des liens entre le régime de précipitation, les tempêtes et l'ONA. La dernière section présente la conclusion.

2.2 Région d'étude, données et méthodes

2.2.1 Région d'étude et ses caractéristiques physiographiques et climatiques

La figure 2.1 présente le domaine de simulation CORDEX-Afrique (Figure 2.1.a), dans lequel seule la région centrée sur le Maghreb (encadré en rouge) ainsi que les sous-régions situées sur les côtes du Maghreb (encadré en bleu) sont analysées. La région indiquée par l'encadré en rouge dans la figure 2.1.a est analysée en utilisant les indices de précipitations définis dans la section 2.2.3.1. Étant donné que les observations (E-OBS) utilisées comme référence pour la validation des MRCs (cf. Section 2.2.2) sont uniquement disponibles le long des côtes du Maghreb, les trois régions côtières de l'Atlantique, de la Méditerranée Ouest et Est seront plus particulièrement évaluées dans la suite (Figure 2.1.b)

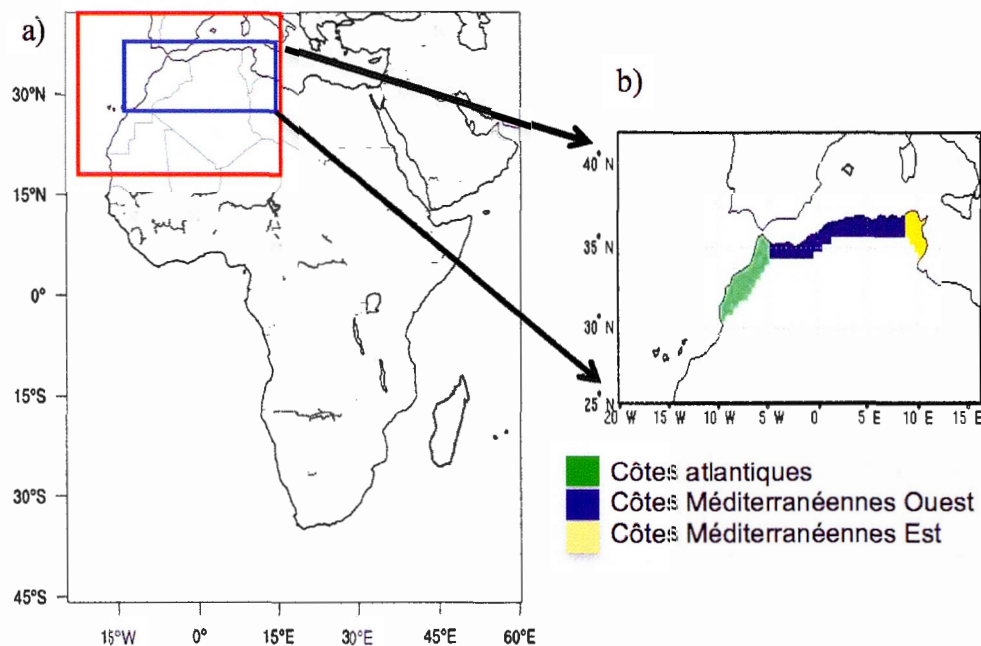


Figure 2.1 a) Le domaine de simulation CORDEX Afrique, avec le Maghreb (encadré en rouge) et le Nord du Maghreb qui inclut les sous-régions utilisées dans cette étude (encadré en bleu) et b) le sous-domaine utilisé pour l'analyse des simulations de MRCs sur le Maghreb.

Le Maghreb comprend les trois pays d'Afrique du Nord-Ouest : la Tunisie, l'Algérie et le Maroc (Figure 2.2). Cette zone comprise entre la mer Méditerranée au Nord, le Sahara au Sud, et l'Océan Atlantique à l'Ouest, comprend une zone désertique recouvrant plus des deux tiers de son territoire. La partie Nord du Maghreb présente des plaines sur les côtes (méditerranéennes et atlantiques), ainsi que des chaînes montagneuses culminant à plus de 2200 m au Maroc, alors que vers le Sud est située une zone désertique (le Sahara), avec des zones pondérées le plus souvent (sauf les montagnes du Tassili n'Ajjar au Sud-Est de l'Algérie Figure 2.2).

Le climat de l'Afrique du Nord se caractérise par des contrastes importants au cours de l'année, avec une période humide de septembre à avril, et une période sèche

de mai à août. Les variations spatiales du cumul de précipitation sont également très marquées depuis les côtes vers l'intérieur des terres, qui est à dominance semi-aride à aride, au fur et à mesure que l'on progresse vers le sud. Cette région est sous l'influence de la branche descendante de la circulation de Hadley en été (i.e. saison sèche) et des perturbations venant de l'Atlantique à l'Ouest ou de la Méditerranée en hiver (i.e. saison humide; Bolle, 2002). La présence des chaînes montagneuses de l'Atlas dépassant les 3 000 m (Figure 2.2), et son étendue et orientation Sud-Ouest/Nord-Est depuis le Maroc jusqu'en Tunisie, favorise l'absence quasi totale de précipitations en direction du Sahara, même en hiver. Tous ces facteurs physiographiques et dynamiques se conjuguent à l'influence de l'Oscillation Nord-Atlantique (ONA) pour modifier le régime de précipitations au Maghreb (Lamb et Peppler, 1987 ; Lamb et al., 1997 ; Portis et al., 2001 ; Mariotti et Dell'Aquila, 2012) et/ou à l'oscillation méditerranéenne (Criado-Aldeanueva et al., 2014). De plus, cette région est sensible au réchauffement de l'océan global ou à de modestes changements dans les gradients zonaux et méridiens de température de surface de l'océan, notamment en bordure de l'Afrique de l'Ouest, à l'origine de fréquences accrues des sécheresses dans la région méditerranéenne (Hoerling et al., 2012). Tous ces facteurs favorisent une grande variabilité spatiale et interannuelle des précipitations, un nombre de jours très limités de pluie (moins de 50 jours par année sur la majeure partie du territoire) et des périodes de sécheresse fréquentes, dont la durée peut s'étendre sur plusieurs années consécutives (Hoerling et al., 2012). Dans la suite, seules les deux saisons pluviales seront analysées, soit l'automne (septembre-octobre-novembre) et l'hiver (décembre-janvier-février). La variabilité du régime de précipitations durant ces deux saisons détermine l'essentiel des déficits ou les excédents de précipitations totales à l'échelle annuelle et interannuelle.

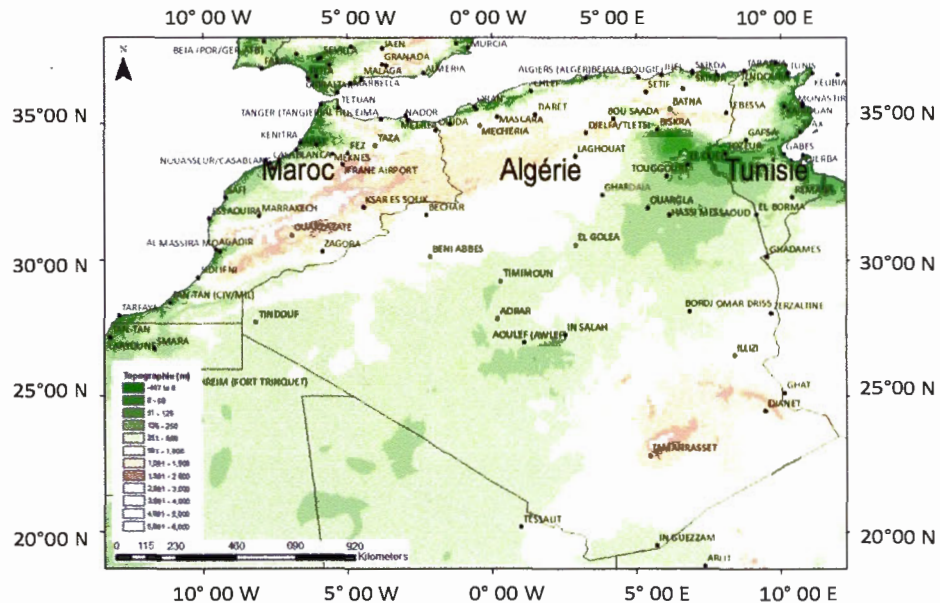


Figure 2.2 Carte du relief dans les trois pays du Maghreb (en m). (Source : Global 30 Arc-Second Elevation (GTOPO30) data courtesy of the U.S. Geological Survey)

2.2.2 Données utilisées

2.2.2.1 Description des MRCs

Les deux MRCs canadiens utilisés dans cette étude sont : le modèle CanRCM4 développé par le centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique (CCmaC), division de la direction de la recherche climatologique d'Environnement Canada (CCmaC/EC ; <http://www.ec.gc.ca/ccmac-cccma/>); le modèle MRCC5 (Hernández-Díaz et al., 2012 ; Laprise et al., 2013) qui est développé par le centre pour l'Étude et la Simulation du Climat à l'Échelle régionale (Centre ESCER) à l'UQAM (<http://www.escer.uqam.ca/>). Même si ces deux modèles partagent la même dynamique issue du modèle GEM (Global Environmental Multi-scale model) d'Environnement Canada (Côté et al., 1998), ils utilisent différents

schémas de paramétrisations physiques. Les informations de base concernant les principales caractéristiques de ces deux MRCs sont fournies au tableau 2.1.

Le CanRCM4 est une version limitée du Modèle de circulation générale de l'atmosphère de quatrième génération (CanAM4) (von Salzen et al., 2013). De ce fait, il utilise les mêmes paramétrages que le CanAM4 (Tableau 2.1). Ce modèle utilise la version 2.6 du "Canadian land-surface scheme" (CLASS 2.7 ; Verseghy, 2000 et 2008) avec un profil de sol divisé en trois couches horizontales, d'épaisseur respective de 0,10, 0,25 et 3,75 m. Le CanRCM4 est basé sur les données géophysiques (continentales) de Global Land Cover 2000 (Commission européenne, Centre commun de recherche 2003, GLC2000; Bartholomé et Belward, 2005).

Le modèle MRCC5 est basé sur une version d'aire limitée du modèle de prévision numérique du temps GEM (Yang et al., 2012 ; Mailhot et al., 2010 ; Tableau 2.1). Il utilise la version 3.5 du "Canadian land-surface scheme" (CLASS 3.5 ; Verseghy 2000 et 2008) avec également trois couches de sol. Plus de détails sur le modèle MRCC5 piloté par les réanalyses ERA-Interim sont fournis dans les études de Hernández-Díaz et al. (2012) et Laprise et al. (2013) réalisée sur le continent africain, ainsi que dans l'étude de Martynov et al. (2012) réalisée sur l'Amérique du Nord. MRCC5 est basée sur les données géophysiques ECOCLIMAP (Masson et al., 2003). Les informations les résolutions des simulations utilisées sont fournies dans le tableau 2.1.

2.2.2.2 Données observées

Les simulations des MRCs sont comparées aux données d'observation suivantes : les données d'observation E-OBS (Haylock et al., 2008), et GPCP (Global Precipitation Climatology Project ; Huffman et al., 2001). Ces deux produits ont été développés sous forme de grille à des résolutions horizontales de 0,25° et 1° respectivement (Tableau 2.2).

Les données E-OBS couvrent la région allant de 25° N à 75° N et de 40° W à 75° E, sur la période 1950 à 2012. Le nombre de stations utilisé pour l'interpolation des données E-OBS décroît pour les pays situés au Sud de l'Europe, notamment en Afrique du Nord et en Europe de l'Est (Figure 1 dans Haylock et al., 2008). Les données globales GPCP sont des mesures de stations au sol et les produits de données satellitaires, couvrant la période 1996 à 2001 (GPCP-1DD v.2.2 ; Huffman et al., 2001). Les estimations des précipitations sont calculées principalement à partir des satellites géostationnaires (GOES - États-Unis, Météosat - Europe, et GMS - Japon), ainsi qu'à partir des satellites en orbite polaire de la NOAA (États-Unis). Les données de précipitations utilisées sont des données journalières que ce soit pour E-Obs ou pour GPCP.

2.2.2.3 Réanalyses

Les produits de réanalyses suivants ont été utilisés : ERA-Interim (European Centre for Medium-range Weather Forecasting ; Uppala et al. 2008 ; Dee et al., 2011), NCEP-NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research ; Kalnay et al., 1996) et NCEP-DOE (National Centers for Environmental Prediction/Department of Energy ; Kanamitsu et al., 2002). Les précipitations des deux réanalyses NCEP utilisées sont des valeurs cumulées totales journalières (à partir des archives disponibles aux 6 heures ; Tableau 2.2) disponibles à une résolution horizontale de 2,5° de latitude x 2,5° de longitude. Les NCEP-NCAR (NCEP-R1) et NCEP-DOE (NCEP-R2) couvrent les périodes 1948 à 2012 et 1979 à 2012, respectivement. Les réanalyses ERA-Interim, qui ont été produites par le Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à moyen terme (CEPMMT), constituent une mise à jour des réanalyses ERA-40 (Simmons et al., 2007). Les réanalyses ERA-Interim couvrent la période 1979 à aujourd'hui. Les précipitations de ces réanalyses sont des données journalières (valeurs totales cumulées à partir des

archives disponibles aux 3 heures ; Tableau 2.2) disponibles à une résolution horizontale de $0,75^\circ$ latitude par $0,75^\circ$ de longitude.

Tableau 2.1 Les principales caractéristiques des deux modèles MRCC5 et CanRCM4 et leurs configurations vis-à-vis des simulations utilisées dans le cadre de CORDEX-Afrique.

	CanRCM4	MRCC5
Schémas de convection	<ul style="list-style-type: none"> • Paramétrage des cumulus : Zhang et McFarlane (1995). • Convection peu profonde : von Salzen et McFarlane (2002) ; von Salzen et al. (2005) 	<ul style="list-style-type: none"> • Convection profonde : Kain et Fritsch (1990). • Convection peu profonde : Kuo (1965) ; Bélair et al. (2005).
Ondes de gravité orographiques	<ul style="list-style-type: none"> • Traînée des ondes de gravité orographiques : Scinocca et McFarlane (2000). 	<ul style="list-style-type: none"> • Traînée des ondes de gravité orographiques de sous mailles : McFarlane (1987).
Schémas de radiations	<ul style="list-style-type: none"> • Méthode Monte Carlo Independent Column Approximation (MCICA) utilisé pour les transferts radiatifs : Barker et al. (2008) ; Pincus et al. (2003). 	<ul style="list-style-type: none"> • Radiations solaires et terrestres : Li et Barker (2005).
Paramétrage de la couche limite planétaire	<ul style="list-style-type: none"> • Échanges de surface de chaleur, l'humidité et la dynamique (schémas de couche limite) : Abdella et McFarlane (1997). 	<ul style="list-style-type: none"> • Paramétrage de la couche limite : Benoit et al. (1989) ; Delage et Girard (1992) ; Delage (1997).
Les conditions aux limites latérales atmosphériques	Toutes les variables pronostiques physiques du modèle global parent CanAM4 guidé par des réanalyses ERA-Interim.	Vent horizontal, humidité spécifique, la température et géopotentielle de réanalyse ERA-Interim.

Tableau 2.2 Descriptions et références des données observées et réanalyses utilisées.

Sources	Période et fréquence	Domaine et résolution	Références
<ul style="list-style-type: none"> • E-OBS ✓ Stations 	<ul style="list-style-type: none"> • 1950-2012 ✓ Journalière 	<ul style="list-style-type: none"> • 25 - 75° N; • 40° W - 75° E; ✓ 0,25 X 0,25 	Haylock et al. (2008)
<ul style="list-style-type: none"> • GPCP ✓ Stations ✓ Satellites 	<ul style="list-style-type: none"> • 1996-2011 ✓ Journalière 	<ul style="list-style-type: none"> • Global, ✓ 1° lat. x 1° lon. 	Huffman et al. (2001)
<ul style="list-style-type: none"> • ERA-Interim ✓ Réanalyses 	<ul style="list-style-type: none"> • 1979- 2013 ✓ 3 heures 	<ul style="list-style-type: none"> • Global ✓ 0,75 X 0,75 	Dee et al. (2011)
<ul style="list-style-type: none"> • NCEP-R1 ✓ Réanalyses 	<ul style="list-style-type: none"> • 1948-2012 ✓ 6 heures 	<ul style="list-style-type: none"> • Global ✓ 2,5° X 2,5° 	Kalnay et al. (1996)
<ul style="list-style-type: none"> • NCEP-R2 ✓ Réanalyses, 	<ul style="list-style-type: none"> • 1979-2012 ✓ 6 heures 	<ul style="list-style-type: none"> • Global ✓ 2,5° X 2,5° 	Kanamitsu et al. (2002)

2.2.2.4 Procédure d'interpolation pour la comparaison des MRCs

Comme le suggère le tableau 2.2, les données de réanalyses et d'observations sont à des résolutions et sur des grilles (projections) différentes de celles des deux MRCs utilisés. C'est pourquoi, afin de comparer tous les produits sur une base commune, une interpolation a été réalisée avec une méthode bilinéaire des données de réanalyses (NCEP-R1 (NCEP-NCAR), NCEP-R2 (NCEP-DOE) et Era-Interim) et d'observations (GPCP) sur la grille du MRCC5 et CanRCM4 de résolution 0.44, sachant que les informations de réanalyses ou d'observation sont à une résolution plus grossière que celles de ce MRC. Comme les données d'observation (E-OBS),

utilisées comme base de référence pour la comparaison de tous les produits, correspondent au seul produit sur une grille à plus fine résolution que celle des deux MRCs (25 au lieu d'environ 45 km), mais également à une résolution la plus proche de celle-ci, l'interpolation par la méthode du plus proche voisin a été réalisée afin de minimiser les différences dans les champs initiaux et les valeurs interpolées. En effet, l'interpolation par plus proche voisin (interpolation arrondie) permet de prendre la valeur la plus plausible de la position souhaitée vis-à-vis du point de grille, en tenant compte du fait que les données E-OBS sont des valeurs interpolées des données de stations, et ne sont uniquement disponibles que le long des côtes océaniques du Maghreb et non interpolées ou manquantes à l'intérieur des terres (Figure 1 dans Haylock et al., 2008).

2.2.3 Méthode d'analyse

2.2.3.1 Critères diagnostiques

- Les indices de précipitations

Les indices de précipitations utilisés pour évaluer la performance des MRCs, proviennent des indices développés dans le cadre du groupe Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices (ETCCDMI ; cf. International CLIVAR Project Office, 2003) et du projet européen Statistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European regions (STARDEX ; cf. Goodess et al., 2003). Dans notre cas, ces indices sont utilisés afin d'évaluer l'occurrence, l'intensité, et la durée des précipitations modérées et extrêmes, ainsi que d'analyser l'occurrence des séquences sèches. Le tableau 2.3 présente la définition de ces indices qui sont calculés pour les saisons d'automne (SON) et d'hiver (DJF), sur la période de 1998 à 2008 qui est période commune pour les observations, les réanalyses et les simulations disponibles. Dans le cas du Maghreb, ces indices ont peu ou pas été utilisés pour évaluer le régime de

précipitations dans cette région d'Afrique, alors qu'ils ont été régulièrement utilisés en Europe (ex. Schmidli et al., 2007 ; van der Linden and Mitchell, 2009), au Québec (Gachon et al., 2005 ; Roy et al., 2012) et dans la région du Sahel en Afrique de l'Ouest (Gachon et al., 2007 ; Diaconescu et al., 2014). Parmi les 27 indices disponibles et couramment utilisés (cf. http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml), cinq indices ont été choisis permettant de caractériser l'occurrence de jours de pluie (Prcp1), l'intensité moyenne par jours de pluie (SDII) et l'intensité extrême ou de précipitations intenses (Prec90p), et la persistance ou le nombre maximal de jours secs consécutifs (CDD), en plus de la précipitation cumulée totale (PrecTOT ; Tableau 2.3).

Tableau 2.3 Indices climatiques de précipitations utilisés pour caractériser l'occurrence, l'intensité, et la durée des données quotidiennes de précipitations.

Indice	Définition	Unité
Prcp1	La fréquence du nombre de jours avec précipitations (seuil $\geq 1\text{mm/jr}$)	%
SDII	Intensité moyenne de précipitations par jours humides (seuil $\geq 1\text{mm/jr}$)	mm/jour
CDD	Nombre maximal de jours secs consécutifs (précipitation $< 1\text{mm/jr}$)	jours
PrecTOT	Précipitation totale (cumuls mensuels ou saisonniers)	mm
Prec90p	90 ^e centile de précipitation quotidienne	mm/jour

- Analyse de l'influence de l'Oscillation Nord-Atlantique (ONA)

Dans notre étude, les séries de données de l'indice ONA sont calculées à partir des données de stations d'observation (Osborn et al., 1999 ; disponibles en ligne :

<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/nao/>). L'indice ONA est basé sur la différence de pression au niveau moyen de la mer (SLP) normalisée entre Lisbonne, au Portugal, et Stykkisholmur/Reykjavik, en Islande (Hurrell, 1995). La série de l'indice ONA est obtenue sur la période 1979 à 2012, pour chaque mois (valeurs moyennes mensuelles de l'indice).

- Analyse de l'influence des tempêtes synoptiques dans la région

Pour cette analyse, la reconstitution des trajectoires des tempêtes extratropicales utilise l'algorithme développé par Sinclair (1997). Cet algorithme utilise le champ de tourbillon, soit le maximum de tourbillon à 1000 hPa, pour reconstituer les trajectoires de cyclones extratropicaux. Les caractéristiques des tempêtes extratropicales sont issues des données de réanalyses globales NCEP-DOE (NCEP-R2) pour l'ensemble de l'hémisphère Nord (au Nord de 20° N), et ce pour la période 1979-2012 et pour chacun des mois d'automne et d'hiver. Dans notre cas, les quatre caractéristiques de tempêtes ont été utilisées afin d'analyser les liens avec la précipitation au Maghreb telles que définies dans le tableau 2.4, à savoir la densité de tempêtes, la circulation (étendue et intensité) associée à chaque tempête, le tourbillon moyen (intensité moyenne) de chaque tempête, et le vent moyen (vitesse) associé à chaque tempête.

Tableau 2.4 Variables des tempêtes utilisées et leurs définitions.

Variables (moyennes mensuelles)	Unité
Densité de trajectoires de tempêtes	nombre/mois
Circulation moyenne dans la zone affectée par la tempête	$10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
Tourbillon absolu moyen de chaque centre cyclonique	10^{-5} s^{-1}
Vitesse moyenne du vent entourant chaque centre	km/h

2.2.3.2 Critères statistiques

Plusieurs critères statistiques ont été utilisés dans les analyses et les représentations graphiques présentées dans la suite pour comparer les observations et les réanalyses avec les simulations des MRCs, nommément :

- Histogramme de fréquence : La distribution de fréquence des précipitations journalières est présentée sous forme d'histogramme (aucune hypothèse sur la distribution empirique n'a été utilisée) pour toutes les données saisonnières durant la période 1998 à 2008. Ces histogrammes présentent les précipitations journalières qui excèdent 1 mm/jour.
- Diagramme de Taylor : Ce diagramme (Taylor, 2001) permet une représentation synthétique en coordonnées polaires de trois critères statistiques, souvent utilisé pour évaluer les modèles de climat (Räisänen, 1997 ; Boer et Lambert, 2001) et/ou pour des études de sensibilité (Denis et al., 2003). Il permet d'établir une relation géométrique reliant le coefficient de corrélation spatiale (R), l'erreur quadratique centrée réduite (E ou RMSD en anglais) et le rapport de variance spatiale normalisée (τ). Ce diagramme est utilisé pour comparer à partir de ces trois critères la performance des simulations des MRCs et des réanalyses par rapport aux observations utilisées comme référence (GPCP ou E-OBS). Ces trois critères statistiques se définissent comme suit :

$$R = \frac{\langle (x_1 - \langle x_1 \rangle)(x_2 - \langle x_2 \rangle) \rangle}{\sqrt{\langle (x_1 - \langle x_1 \rangle)^2 \rangle} \sqrt{\langle (x_2 - \langle x_2 \rangle)^2 \rangle}} \quad (2.1)$$

$$E = \sqrt{1 - 2\tau R + \tau^2} \quad (2.2)$$

$$\tau = \sqrt{\frac{\langle (x_1 - \langle x_1 \rangle)^2 \rangle}{\langle (x_2 - \langle x_2 \rangle)^2 \rangle}} \quad (2.3)$$

Avec l'indice 2 indique la base de données observée utilisée comme référence, et l'indice 1 les bases de données à évaluer; x réfère aux composantes des champs de précipitations.

- Les distributions statistiques : Le « box plot » (ou graphique en boîte à moustache) sera utilisé pour analyser la distribution statistique des données quotidiennes par saison incluant la médiane, le premier et le troisième quartile, et les valeurs inférieures ou supérieures à ceux-ci.
- Corrélations temporelles : on calcule les corrélations temporelles (via les corrélations de Pearson, Spearman et Kendall) entre les variables qui caractérisent les tempêtes (densité, intensité, circulation et vitesse), l'indice ONA et les indices climatiques de précipitations (Prcp1, CDD, SDII et Prec90p). Le « p-value » est aussi calculé pour déterminer si la corrélation est statistiquement significative ou non. Ces analyses de corrélation avec trois méthodes différentes permettront d'évaluer l'incertitude reliée à l'usage de méthodes paramétrique (Pearson) ou non-paramétrique (Spearman et Kendall), celles-ci étant définies comme suit :
 - Corrélation paramétrique de Pearson : Le coefficient de corrélation de Bravais-Pearson (Pearson, 1895), permettant de mettre en évidence si une relation affine ou linéaire existe entre une paire de variables. C'est la méthode la plus couramment utilisée. Le calcul du coefficient de corrélation linéaire (r) de deux variables X et Y correspond à la covariance (cov) de X et Y divisée par le produit non nul des écarts-types (σ) de X et Y via les relations suivantes (Bowley, 1901), avec N la taille de l'échantillon et \bar{X} et \bar{Y} les moyennes des variables X et Y :

$$\text{cov}(X, Y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y}) \quad (2.3)$$

$$r(X, Y) = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \quad (2.4)$$

- Corrélation non-paramétrique ρ de Spearman : Le coefficient de corrélation de Spearman, ou coefficient de corrélation de rang, vérifie l'existence d'une relation monotone entre le rang de deux séries de données (Spearman, 1904). Cette méthode est moins sensible aux valeurs singulières dans les séries de données que la méthode de Pearson, et en particulier lorsque les distributions à étudier sont dissymétriques, la loi de Spearman est préférable à celle de Pearson (Bonett et Wright, 2000). Le coefficient de Spearman est fondé sur l'étude de la différence des rangs entre les attributs des individus pour les deux variables X et Y, via la relation suivante :

$$\rho(X, Y) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [r(X_i) - r(Y_i)]^2}{N^3 - N} \quad (2.5)$$

Avec : $r(X_i)$: rang de X_i dans la distribution $X_1 \dots X_N$; $r(Y_i)$: rang de Y_i dans la distribution $Y_1 \dots Y_N$, et N la taille de l'échantillon.

- Corrélation non-paramétrique de Kendall : Cette méthode de Kendall nécessite que les variables soient mesurées au moins dans une échelle ordinale, de telle manière que chaque mesure des deux variables puisse être rangée (Kendall, 1938). Le principe est de trier la première série (X) et les rangs des valeurs de la deuxième série vis-à-vis de la première observation, on attribue +1 pour les valeurs qui lui sont supérieures, et -1 pour les valeurs inférieures. On obtient ainsi une nouvelle liste des valeurs qui présente les soldes (S) entre des nombres positifs et négatifs (Prokhorov, 2001). S est le solde total égal à $N(N-1)/2$ si l'ordre est absolument respecté (avec N la taille de

l'échantillon). Si l'ordre est parfaitement inversé, $S = -N(N - 1)/2$. En cas d'indépendance totale, $S = 0$. Le coefficient K de Kendall se calcule donc ainsi :

$$K = \frac{S}{\frac{N(N - 1)}{2}} \quad (2.6)$$

2.3 Résultats

2.3.1 Analyse du régime de précipitations au Maghreb

2.3.1.1 Moyennes saisonnières des indices de précipitations sur l'Afrique du Nord

a) L'occurrence de jours humides

La figure 2.3 présente la comparaison sur l'Afrique du Nord des moyennes saisonnières de la fréquence du nombre de jours de pluie pour l'automne et l'hiver à partir des données observées (E-OBS et GPCP), réanalysées (NCEP-R1, NCEP-R2 et ERA-Interim) et des trois simulations de MRCs (MRCC5 (résolution 0,44) et CanRCM4-0.44 (CanRCM4 de résolution 0,44) et CanRCM4-0.22 (CanRCM4 de résolution 0,22)). Globalement, le pourcentage des jours de précipitations diminue du Nord près des côtes méditerranéennes et atlantiques en direction du Sud, peu importe la saison et les produits d'observations ou de réanalyses. Cette diminution ou gradient Nord-Sud est relativement bien reproduit par les MRCs par rapport aux observations, ainsi que pour les réanalyses, sauf pour les réanalyses NCEP-R1 qui tendent à limiter l'extension des régions humides exclusivement le long des côtes méditerranéennes de l'Algérie et de la Tunisie. L'augmentation des jours de pluie de l'automne à l'hiver est également relativement bien reproduite par les MRCs, sauf pour le CanRCM4 qui surestime la fréquence des jours humides sur les reliefs de l'Atlas en automne. Globalement, le pourcentage de jours de précipitations est plus élevé sur les côtes Est, particulièrement les côtes tunisiennes, avec 30 % de jours de précipitations en automne, et 50 % en hiver. Cet accroissement est d'ailleurs mieux représenté dans les

MRCs que dans les réanalyses ou même dans les données GPCP. Pour ces dernières données observées, cette variabilité spatiale est plus faible que dans le cas d'E-OBS. Les deux simulations du CanRCM4, utilisant deux résolutions différentes, sont relativement semblables en automne, avec toutefois une augmentation plus substantielle des jours de pluie en hiver dans la partie Est du Maghreb, ainsi qu'un gradient Ouest-Est plus marqué dans la simulation à plus haute résolution ($0,22$ versus $0,44^\circ$) en accord avec les observations (et le MRCC5). De plus, même en plein cœur du Sahara, le CanRCM4 (peu importe sa résolution) présente sporadiquement quelques occurrences de jours de pluie, i.e. soit un biais humide au cœur du désert non présent dans les autres produits de réanalyses ou la simulation du MRCC5.

b) Le nombre maximal de jours secs consécutifs

La figure 2.4 présente la comparaison sur l'Afrique du Nord des moyennes saisonnières du nombre maximal de jours secs consécutifs pour l'automne et l'hiver à partir des données d'observation, de réanalyses et des trois simulations de MRCs. Globalement, comme suggérée dans les occurrences de jours de pluie, la persistance des jours secs augmente du Nord, et près des côtes méditerranéennes et atlantiques, en direction du Sud, peu importe la saison, que ce soit pour les observations, les réanalyses ou les simulations. Le modèle MRCC5 reproduit assez bien le nombre maximal de jours secs consécutifs pour l'hiver et l'automne, par contre le CanRCM4 surestime celui-ci en automne, et le sous-estime en hiver. Ceci est en accord avec la surestimation de fréquence des jours humides en hiver, précédemment suggérée pour le CanRCM4 (Figure 2.3). Ces résultats confirment aussi que les réanalyses NCEP-R1 tendent à limiter l'extension des régions humides, ou à surestimer l'extension des régions sèches, essentiellement le long des côtes méditerranéennes. Les données observées GPCP, les réanalyses NCEP-R2 et les simulations du CanRCM4 présentent des séquences de jours secs consécutifs sur le Sahara, entre 40 et 60 jours par saison,

alors que la pluie est quasi absente dans cette région et donc les séquences sèches s'étendent sur 90 jours peu importe la saison.

c) L'intensité moyenne de précipitations par jours humides

L'intensité moyenne de précipitations par jours humides est présentée et comparée entre les différents produits dans la figure 2.5. Contrairement à l'occurrence des jours de pluie qui augmente de l'automne à l'hiver, l'intensité n'augmente pas de façon substantielle dans les observations (E-OBS), mis à part pour les observations GPCP surtout à l'Ouest et à l'Est du Maghreb. Ces dernières données comportent d'ailleurs une surestimation quasi systématique par rapport aux valeurs d'E-OBS, dans ces régions. Seul le MRCC5 présente une bonne distribution des intensités de précipitations au Maghreb, en dépit d'une sous-estimation sur la côte Est de cette région. Tous les autres produits de réanalyses (NCEP-R1/2 et ERA-Interim) et le CanRCM4 (les deux résolutions) présentent une sous-estimation des intensités sur la majorité des régions.

d) Le 90^e centile de précipitations quotidiennes

La comparaison sur l'Afrique du Nord des moyennes saisonnières du 90^e centile de précipitation quotidienne à partir des différents produits d'observation, de réanalyses et des simulations de MRCs est présentée dans la figure 2.6. Conformément à l'intensité de précipitations, le 90^e centile n'augmente pas de l'automne à l'hiver pour les observations (E-OBS), les réanalyses (NCEP-R1-2) et les simulations, sauf pour les observations GPCP surtout le long des côtes. Ces données surestiment les extrêmes de précipitations par rapport aux valeurs d'E-OBS. Le modèle MRCC5 présente des valeurs proches des observations E-OBS, par contre il sous-estime cet indice, sur une partie de la côte Est et le surestime sur une partie de la côte Ouest du Maghreb. Les précipitations intenses simulées par le CanRCM4 (0,22

et 0,44°) sont le plus souvent sous-estimées, sur toute la région, comme la majorité des réanalyses.

e) Le cumul saisonnier de précipitations

La figure 2.7 présente la comparaison du cumul saisonnier de précipitations. Les cumuls de précipitations semblent plus nettement contrastés en automne qu'en hiver le long des côtes du Maghreb par rapport à l'intérieur des pays et d'Ouest en Est dans les observations E-OBS. Ce contraste est moins nettement prononcé dans l'autre série d'observations GPCP et dans les réanalyses et simulations de MRCs. En particulier, que ce soit les réanalyses ou les MRCs (MRCC5 et CanRCM4), les cumuls de précipitations sont sous-estimés par rapport aux observations E-OBS (surtout le long des côtes) en automne. Pendant l'hiver, la variabilité entre les réanalyses et les modèles augmente, le CanRCM4 (deux résolutions) et les réanalyses NCEP et Era-Interim sous-estiment la précipitation (par rapport à E-OBS), alors que GPCP et le MRCC5 la surestiment. Les simulations du CanRCM4 et les réanalyses ERA-Interim présentent des cumuls plus élevés que les observations, bien que l'intensité soit plus faible, voire très faible, pour les réanalyses ERA-Interim. Ceci est dû, comme suggéré précédemment, au fait que ce MRC et ces réanalyses surestiment de façon notable l'occurrence des jours humides par rapport aux observations E-OBS.

2.3.1.2 Analyses statistiques inter-régionales

✓ Distributions de fréquence de précipitations

Les figures 2.8 et 2.9 présentent les distributions de fréquence de précipitations sur les trois sous-régions choisies (Figure 2.1 panneau b). Les réanalyses Era-Interim enregistrent des pourcentages très élevés de précipitations de faibles intensités sur les côtes atlantiques, notamment en hiver, avec plus de 60 % de précipitations entre 1 et 4 mm/jour. Par contre, sur les côtes méditerranéennes Ouest et Est, les pourcentages de jours de faibles intensités sont nettement plus importants

que les observations E-OBS, en automne. Les réanalyses NCEP-R1/2 enregistrent aussi des pourcentages élevés de précipitations peu intenses (la majorité des précipitations durant les deux saisons sont comprises entre 1 et 4 mm/jour). En automne les observations GPCP présentent des pourcentages trop élevés de précipitations intenses, par rapport à l'observation E-OBS, sur les régions atlantiques et méditerranéennes Ouest, et la même distribution de précipitations journalières, sur la région méditerranéenne Est. Cependant, en hiver, ces données présentent de forts pourcentages de précipitations intenses et de faibles pourcentages de précipitations moyennes et faibles pour les trois sous-régions. Les simulations CanRCM4 de résolution 0.44° sous-estiment les précipitations élevées tandis que la résolution 0.22° les surestime sur les régions méditerranéennes et les sous-estime sur la région atlantique, durant l'automne. Ces deux simulations présentent, durant l'hiver, des pourcentages élevés de précipitations de faibles intensités et sous-estiment les extrêmes ou les fortes intensités. Le MRCC5 révèle quant à lui des pourcentages élevés de précipitations intenses durant les deux saisons, et ce pour les trois sous-régions, relativement similaires aux observations.

✓ Box-plots des indices de précipitations

La figure 2.10 présente les box-plot des indices de précipitations à partir des données observées (E-OBS et GPCP), réanalysées (NCEP-R1, NCEP-R2 et ERA-Interim) et des trois simulations de MRCs (MRCC5 et CanRCM4-0.44 et 0.22), sur les trois sous-régions du Maghreb.

Les observations GPCP sous-estiment l'occurrence des précipitations et surestiment l'intensité et les extrêmes de précipitations par rapport aux données E-OBS, durant l'hiver. Par contre, durant l'automne, les valeurs de GPCP sont relativement similaires aux observations E-OBS, malgré une sous-estimation du nombre maximal de jours secs consécutifs. L'intensité des jours de précipitations présente des médianes identiques sur les côtes atlantiques et méditerranéennes Ouest

entre GPCP et E-OBS; par contre, elle est surestimée sur les côtes méditerranéennes Est pour GPCP. Les médianes de 90^e centile de précipitations sont relativement similaires entre les deux séries d'observations sur les côtes méditerranéennes Est, mais surestimées sur les côtes atlantiques et sous-estimées sur les côtes méditerranéennes Ouest pour les séries GPCP par rapport à E-OBS.

Concernant les réanalyses NCEPs (NCEP-R1/R2), dans les trois sous-régions, ces données sous-estiment les valeurs médianes des occurrences de jours avec précipitation, durant les deux saisons, par contre, elles surestiment les valeurs extrêmes de cet indice, en hiver (par rapport à E-OBS). Durant l'automne, le nombre maximal de jours secs consécutifs présente des valeurs similaires à l'observation pour les réanalyses NCEP-R1, et il est surestimé par les réanalyses NCEP-R2, sur les côtes atlantiques. Ces deux séries de réanalyses surestiment cet indice sur les côtes méditerranéennes. Cependant, durant l'hiver, les réanalyses NCEPs présentent des valeurs de médianes similaires aux données observées E-OBS, et surestiment la persistance des séquences sèches les plus longues sur les côtes méditerranéennes, de même que sur les côtes atlantiques. Durant les deux saisons pluviales, les réanalyses NCEPs sous-estiment les indices SDII et le Prec90p sur les trois sous-régions du Maghreb.

Durant l'automne, sur les trois sous-régions, les réanalyses ERA-Interim présentent des médianes relativement similaires aux valeurs observées pour les occurrences de jours avec précipitations et pour le nombre maximal de jours secs consécutifs. Cependant, ces réanalyses sous-estiment les intensités moyennes et extrêmes de précipitations (i.e. SDII et Prec90p). Durant l'hiver, l'occurrence de précipitations des réanalyses ERA-Interim est également relativement similaire à l'observation sur les côtes atlantiques, mais celle-ci est sous-estimée sur les côtes méditerranéennes Ouest et surestimée sur les côtes méditerranéennes Est. L'intensité

et les extrêmes de précipitations sont également sous-estimés comme pour les réanalyses NCEPs, sur les trois régions.

Pendant l'automne, les simulations du CanRCM4 (deux résolutions) surestiment les pourcentages des jours avec précipitations et sous-estiment l'intensité, le nombre maximal de jours secs consécutifs ainsi que les extrêmes de précipitations, sur les trois sous-régions. Cependant, durant cette saison, le modèle MRCC5 sous-estime le pourcentage de jours de précipitations et surestime le nombre de jours secs consécutifs, l'intensité et les extrêmes de précipitations par rapport aux observations, sur les côtes méditerranéennes. Concernant les côtes atlantiques, ce MRC semble simuler des valeurs plus proches des observations (E-OBS), pour les différents indices de précipitations.

Durant l'hiver, sur les côtes atlantiques et méditerranéennes Ouest, les simulations CanRCM4 sous-estiment la fréquence du nombre de jours de pluie, l'intensité et le 90^e centile de précipitation quotidienne, mais le nombre maximal de jours secs présente des médianes proches des observations E-OBS. Cependant, sur les côtes méditerranéennes Est, l'occurrence des jours de pluie et la durée des séquences sèches sont relativement similaires aux observations E-OBS. L'intensité et le 90^e centile de précipitations sont sous-estimés, sur les trois sous-régions. Durant cette saison, le modèle MRCC5 semble simuler des valeurs plus proches des observations E-OBS pour tous les indices de précipitations, sur les côtes atlantiques. Cependant, sur les côtes méditerranéennes, ce dernier surestime le pourcentage de jours de précipitations et présente des médianes similaires aux observations E-OBS et des intervalles interquartiles ainsi que des extrêmes plus importants pour les indices SDII et Prec90p.

✓ Diagrammes de Taylor des indices de précipitations

Les figures 2.11 et 2.12 présentent les diagrammes de Taylor des indices de précipitations à partir des données observées, réanalysées et des trois simulations de MRCs, sur la région des côtes atlantiques durant l'automne et l'hiver, respectivement. Durant l'automne, la fréquence des jours de précipitations indique que les données MRCC5, GPCP et ERA-Interim sont les plus similaires aux observations E-OBS (présentent les corrélations les plus fortes et les erreurs RMSD les plus faibles), comme suggérées dans les analyses par box-plot (Figure 2.10). Cependant, durant l'hiver, les réanalyses NCEP-R2 et les simulations de CanRCM4s (de résolution 0,22 x 0,44) sont les données les plus proches des observations. Pour le nombre de jours secs, les simulations MRCC5 et les données GPCP présentent des résultats relativement semblables aux observations durant les deux saisons pluviales. Cependant, les séries de réanalyses ou les simulations surestiment cet indice, mais les simulations CanRCM4 sont similaires aux observations en automne. Quant à l'intensité moyenne et le 90^e centile de précipitation quotidienne, les données MRCC5 et GPCP surestiment ces indices, durant les deux saisons. Ceci est en accord avec les analyses par box-plot (Figure 2.10). Les données de réanalyses sous-estiment le plus souvent ces deux indices, sauf pour le CanRCM4 qui semble relativement bien reproduire l'intensité moyenne de précipitation journalière en automne.

Les diagrammes de Taylor des indices de précipitations à partir des données observées, réanalysées et des trois simulations de MRCs, sur la région des côtes méditerranéennes Ouest, durant l'automne et l'hiver sont présentés aux figures 2.13 et 2.14, respectivement. Durant l'automne, les corrélations de la fréquence du nombre de jours de pluie se situent entre 0,95 et 0,8, avec les corrélations les plus élevées obtenues à partir du MRCC5 et GPCP. Les réanalyses (ERA-Interim) et les simulations CanRCM4s surestiment la variabilité spatiale de l'occurrence des jours

de pluie. Également, en hiver, les corrélations de l'occurrence des jours de pluie les plus élevés sont obtenues avec le MRCC5 et les réanalyses NCEP, mais les données (GPCP, CANRCM4s et ERA-Interim) sous-estiment la variabilité spatiale de la fréquence du nombre de jours de pluie. En automne, les corrélations des séquences sèches les plus élevées sont obtenues avec les données GPCP et ERA-Interim; par contre, les simulations CanRCM4s sous-estiment cette variabilité, et MRCC5 et NCEPs la surestiment. Néanmoins, cette variabilité spatiale des séquences sèches est surestimée par toutes les données en hiver. Durant les deux saisons pluviales, les corrélations spatiales de l'intensité et le 90^e centile de précipitations quotidiennes les plus élevés sont obtenus à partir des simulations MRCC5.

Les figures 2.15 et 2.16 présentent les Diagrammes de Taylor des indices de précipitations à partir des données observées, réanalysées et des trois simulations de MRCs, sur la région des côtes méditerranéennes Est, durant l'automne et l'hiver, respectivement.

En automne, les corrélations des fréquences du nombre de jours de pluie sont plus élevées lorsqu'il s'agit des réanalyses NCEPs et ERA-Interim et des observations GPCP (suggéré dans la figure 2.10). Cependant, la variabilité spatiale de l'occurrence de pluie est sous-estimée par les simulations du modèle MRCC5 et elle est surestimée par les données CanRCM4s. D'un autre côté, durant l'hiver, les simulations CanRCM4s présentent les corrélations de l'occurrence de précipitations les plus fortes. Cependant, les simulations MRCC5 et ses pilotes ERA-Interim surestiment la variabilité spatiale de l'occurrence de précipitations et les données NCEPs et GPCP la sous-estiment.

Durant l'automne, pour les séquences sèches, les données (CanRCM4s et ERA-Interim) présentent des résultats partiellement identiques aux observations (les corrélations spatiales sont fortes et les RMSE sont faibles). Durant cette saison, la

variabilité spatiale des séquences sèches est sous-estimée par les données GPCP et NCEPs, et elle est surestimée par le MRCC5, suggérée aussi précédemment (Figure 2.10). Cependant, en hiver, les corrélations des séquences sèches sont plus élevées pour les données ERA-Interim, GPCP et CanRCM4. Les réanalyses NCEP sous-estiment la variabilité spatiale des séquences sèches, contrairement au modèle MRCC5 qui la sous-estime.

Pour l'indice d'intensité de précipitation quotidienne, les observations GPCP et les simulations MRCC5 semblent avoir les corrélations les plus élevées et des RMSE les plus faibles, en automne. Pareillement, les données GPCP semblent proches des observations pour le 90^e centile de précipitations quotidiennes, puisque la corrélation spatiale de cet indice est forte et la variance spatiale normalisée est proche à 1. Cependant, les autres données sous-estiment ces deux indices puisque leurs variances spatiales normalisées sont inférieures à 1.

Durant l'hiver, les corrélations des intensité et 90^e centile de précipitations quotidiennes du modèle MRCC5 sont situées entre 0,8 et 0,9 et, la variance spatiale normalisée est proche à 1, donc le modèle MRCC5 semble bien simuler ces deux indices, tel que suggéré précédemment (Figure 2.10). Les données GPCP présentent des valeurs d'intensité et des extrêmes de précipitations plus élevés puisque la variance spatiale normalisée est supérieure à 1. Cependant, les autres modèles présentent des valeurs plus faibles puisque leurs variances spatiales normalisées sont inférieures à 1.

2.3.2 Liens entre les tempêtes, les indices de l'ONA et de précipitation

- Période d'étude 1998 à 2010

Les figures 2.17 à 2.20 présentent les corrélations temporelles en utilisant les méthodes de Spearman, Kendall et Pearson, des indices de

précipitations avec les caractéristiques des tempêtes et l'indice ONA des trois sous-régions durant l'automne et l'hiver.

En automne, la précipitation totale augmente avec l'occurrence des tempêtes sont plus fréquentes, sur les côtes atlantiques. Ce lien diminue le long des côtes de la Méditerranée, mais présente des corrélations significatives pour le modèle MRCC5. Les occurrences de précipitations augmentent également lorsque la fréquence des tempêtes augmente sur les côtes atlantiques et méditerranéennes Est. Ce lien s'affaiblit sur les côtes méditerranéennes ouest, particulièrement dans le cas des deux simulations CanRCM4s. Les séquences sèches diminuent/augmentent lorsque la fréquence des tempêtes augmente/diminue, sur les côtes atlantiques et méditerranéennes. Ce lien diminue sur les côtes méditerranéennes Ouest, en utilisant CanRCM4s et sur les côtes méditerranéennes Est en utilisant MRCC5. L'intensité de précipitation quotidienne s'accroît quand la fréquence de tempêtes augmente sur l'Atlantique, en utilisant MRCC5 et CanRCM4, sur la Méditerranée Est en utilisant MRCC5 et sur la Méditerranée Ouest en utilisant CanRCM4. Également, l'augmentation de la fréquence des tempêtes accroît les extrêmes de précipitations des simulations CanRCM4 sur l'Atlantique, des simulations CanRCM4s et observations E-OBS sur la Méditerranée Ouest et des simulations MRCC5 sur la Méditerranée Est (Figure 2.17 et 2.18).

Contrairement à la saison d'automne, en hiver, lorsque les tempêtes sont plus fréquentes, la précipitation totale et l'occurrence augmentent, sur les régions méditerranéennes. Les séquences sèches diminuent quand l'occurrence des tempêtes augmente, sur les côtes méditerranéennes, ce lien est presque absent sur l'Atlantique.

Lorsque les tempêtes sont plus fréquentes au Maghreb en hiver, l'intensité de précipitations augmente en allant de l'Ouest vers l'Est. En effet, les corrélations entre l'intensité de précipitation et les tempêtes augmentent et sont significatives, sur les

côtes méditerranéennes. Ces corrélations sont plus significatives sur les régions méditerranéennes Est pour les trois simulations (avec 0,8 pour les simulations de CanRCM4-0.44). La forte occurrence des tempêtes en hiver conduira également à l'augmentation des extrêmes de précipitations en allant de l'Ouest vers l'Est du Maghreb. En effet, les corrélations entre les caractéristiques des tempêtes et les extrêmes de précipitations sont positives pour les différentes données surtout pour les observations E-OBS, sur les côtes méditerranéennes. Ces corrélations sont plus significatives sur la région méditerranéenne Est. (Figure 2.19 et 2.20)

Les corrélations entre l'indice ONA et l'intensité et les extrêmes de précipitations quotidiennes sont significatives et négatives pour les simulations (MRCC5 et CanRCM4s) sur les côtes atlantiques. Les corrélations entre l'indice ONA et les cumuls pluvieux des observations et des simulations sont significatives et négatives sur les côtes atlantiques. Ces corrélations sont non significatives sur les côtes méditerranéennes (en couleur grise). Donc, la diminution de l'indice ONA, en automne, est statistiquement associée à l'augmentation de l'intensité et des extrêmes de précipitations en utilisant les simulations et à l'augmentation des cumuls pluvieux en utilisant les observations et les simulations sur les côtes atlantiques. Ce lien est faible sur les côtes méditerranéennes (Figure 2.17 et 2.18). Les corrélations entre l'indice ONA et l'occurrence de précipitations sont négatives et significatives sur les régions méditerranéennes, et non significatives sur les côtes atlantiques. Donc, l'indice ONA diminue, en hiver, lorsque l'occurrence de précipitations augmente sur les régions méditerranéennes, ce lien est plus faible sur les côtes atlantiques (les corrélations sont non significatives). (Figure 2.19 et 2.20)

- Période d'étude 1979 à 2012

Les liens entre le régime de précipitations issu des observations E-OBS et les caractéristiques des tempêtes ou l'indice ONA, sur la période 1979-2012 sont présentés sous forme de graphiques de corrélations dans les figures 2.21 et 2.22.

Les liens entre le régime de précipitations et les tempêtes s'accroissent par rapport à la période (1998 à 2010), étant donné que les corrélations sont plus significatives. En effet, les anomalies positives des fréquences des tempêtes engendrent une augmentation de l'occurrence, le cumul et de l'intensité des précipitations sur l'Atlantique en automne. Cependant, en hiver, lorsque la fréquence des tempêtes augmente sur la région Atlantique et méditerranéenne Ouest, les cumuls/fréquences/extrêmes de précipitations augmentent (Figure 2.21 et 2.22).

Les liens entre le régime de précipitations et l'indice ONA s'accroissent également par rapport à la période (1998 à 2010). La diminution de l'indice ONA est statiquement reliée à l'augmentation de cumuls et de fréquence de précipitations, étant donné que les corrélations entre l'ONA et les cumuls et la fréquence de précipitations sont négatifs et significatifs, en automne, sur les côtes atlantiques. Ce lien diminue sur les côtes de la Méditerranée, étant donné que les corrélations entre le régime de précipitations et l'indice ONA ne sont plus significatives sur cette région (corrélations en couleurs grises). Bien que, en hiver, la diminution de l'indice ONA est statiquement reliée à l'augmentation de cumuls, fréquences et extrêmes de précipitations, sur les côtes atlantiques et méditerranéennes Ouest. Ce lien diminue sur la Méditerranée Est, puisque les corrélations entre l'ONA et le régime de précipitations ne sont plus significatives sur cette région (Figure 2.21, 2.22).

L'utilisation d'une période plus longue accroît les liens de corrélations entre l'indice ONA, les caractéristiques des tempêtes et les indices de précipitation, pour les différentes régions du Maghreb

2.4 Conclusion

Ce travail avait pour objectif d'évaluer le régime des précipitations simulées sur le Maghreb par deux MRCs à partir de trois séries de simulations utilisant des résolutions de $0,44^\circ$ et de $0,22^\circ$ réalisées sur le domaine CORDEX-Afrique pilotées

par les réanalyses ERA-Interim durant la période de 1998 à 2008. Ces simulations ont été évaluées et comparées aux deux séries d'observations (E-OBS et GPCP), et aux trois séries de réanalyses (i.e., NCEP-R1, NCEP-R2 et ERA-Interim). La caractérisation du régime de précipitations au Maghreb a été effectuée en utilisant les indices de précipitations (occurrence des jours de pluie, durée des séquences sèches et intensités moyennes et fortes des précipitations). À partir des anomalies de l'indice d'Oscillation Nord-Atlantique (ONA) et des caractéristiques de tempêtes au-dessus du bassin méditerranéen, nous avons également déterminé les liens entre les téléconnexions ou variables d'échelle synoptique et le régime de précipitations automnal et hivernal.

Au Maghreb, le régime de précipitations est caractérisé par une variabilité spatiale importante, avec un nombre de jours de pluie plus fréquent sur les côtes et qui diminue vers l'intérieur du continent en direction du Sahara. Cette variabilité spatiale est relativement bien reproduite par les MRCs par rapport aux observations. Par contre, les données GPCP surestiment la précipitation journalière en termes d'intensité et d'extrêmes et sous-estiment la fréquence de précipitations. Pour les réanalyses NCEP-R1, NCEP-R2 et ERA-Interim, ces données sous-estiment le plus souvent les précipitations quotidiennes. Les simulations MRCC5 présentent des résultats plus proches des observations E-OBS que leurs valeurs pilotes ERA-Interim qui surestiment l'occurrence des pluies, sur les côtes tunisiennes, et sous-estiment l'intensité et les extrêmes de précipitations dans l'ensemble des régions. Par contre, les deux simulations CanRCM4s sont relativement similaires aux réanalyses ERA-Interim, et donc surestiment largement l'occurrence de précipitations et sous-estiment l'intensité et les extrêmes, sur l'ensemble du Maghreb.

La comparaison entre les produits observés et simulés, pour les trois sous-régions du Maghreb (côtes Atlantiques, côtes méditerranéennes Ouest et Est), révèle que :

- En automne : Les données GPCP reproduisent bien l'occurrence de précipitations, mais, l'intensité de précipitations n'est relativement bien reproduite que sur les côtes atlantiques et méditerranéennes Ouest. Cependant, les réanalyses (NCEPs et ERA-Interim) sous-estiment l'intensité et les extrêmes de précipitations, quelle que soit la région. Par contre, l'occurrence de précipitations est relativement bien reproduite par les réanalyses ERA-Interim, et sous-estiment par les NCEPs (NCEP-R1/R2). D'autre part, le MRCC5 reproduit assez bien l'occurrence de précipitation, le nombre maximal de jours secs consécutifs, sur les côtes atlantiques. De plus, ce MRC semble relativement bien reproduire les intensités de précipitations sur les côtes atlantiques et les côtes méditerranéennes Ouest. Par contre, le CanRCM4 surestime systématiquement, quelle que soit la région, l'occurrence de précipitations et sous-estime le plus souvent les précipitations modérées à intenses et les séquences sèches.
- En hiver : Les observations GPCP et les réanalyses NCEPs tendent à sous-estimer l'occurrence de précipitations. D'autre part, les ERA-Interim reproduisent relativement bien l'occurrence de jours de pluie, sur les côtes atlantiques. Cependant, les intensités modérées et extrêmes de précipitations sont surestimées par les données GPCP et sous-estimées par les données ERA-Interim et NCEPs. Le MRCC5 reproduit relativement bien l'occurrence des jours de pluie et les séquences sèches sur les côtes du Maghreb. Par contre, le modèle CanRCM4 ne reproduit l'occurrence observée des jours de pluie et les séquences sèches que sur les côtes méditerranéennes Est. Cependant, le modèle MRCC5 simule adéquatement les intensités modérées et fortes de précipitation sur les deux côtes méditerranéennes, il tend à les surestimer ailleurs. Cependant, les simulations du CanRCM4 sous-estiment, peu importe la résolution utilisée, les intensités modérées et fortes de précipitation.

Les analyses faites sur les trois régions du Maghreb et pour les deux saisons pluviales à propos des liens ONA/tempêtes et régime de précipitations ont révélé que :

- En automne : l'occurrence de précipitations augmente lorsque la fréquence des tempêtes augmente sur les côtes atlantiques et les côtes méditerranéennes Est. Ce lien s'affaiblit sur les côtes méditerranéennes Ouest (corrélations faibles et non significatives). L'intensité de précipitations quotidiennes augmente, sur les côtes Atlantiques, lorsque l'occurrence, la circulation, l'intensité et la vitesse des tempêtes augmentent, ce lien diminue sur les côtes méditerranéennes. D'autre part, la diminution de l'indice ONA est statistiquement associée à l'augmentation de l'intensité des précipitations, sur les côtes atlantiques.
- En hiver : L'augmentation de la fréquence des tempêtes favorise l'augmentation de l'occurrence de précipitations et de cumuls pluviaux sur les deux régions Ouest et est méditerranéennes, et notamment l'augmentation d'intensité modérée et extrême des précipitations sur les côtes tunisiennes. D'autre part, la diminution de l'indice ONA est statistiquement associée à l'augmentation de l'occurrence des précipitations, sur les côtes méditerranéennes.

Ce travail démontre que les MRCs reproduisent assez bien le cumul saisonnier (automne et hiver) de la précipitation sur l'ensemble du Maghreb, par contre ces modèles ont plus de difficulté à simuler dans leur ensemble l'occurrence, la durée, et l'intensité des précipitations, surtout pour le CanRCM4 ce qui a aussi été confirmé ailleurs en Afrique par l'étude de Diaconescu et al. (2014).

L'analyse des liens entre le régime de précipitations au Maghreb et l'ONA a démontré aussi que le régime de précipitations augmente/diminue lorsque l'indice

ONA est négatif/positif sur la majeure partie du Maghreb, ce qui a été démontré par Belaassal (1998), Xoplaki (2002) et le Nord du Maroc par Matti et al. (2009). Les études de Barkhordarian et al. (2013), Hoerling et al. (2012) et Martin-Vide et al. (2006) concluent que la sécheresse observée au Maghreb en hiver ne peut pas être attribuée à une variation observée du comportement de ONA. Par contre, notre étude suggère que l'intensité de précipitation est affectée par l'ONA, sur les côtes atlantiques, en automne et l'occurrence de précipitations et les séquences sèches sont affectées par l'ONA, sur les côtes méditerranéennes, en hiver.

Quant au lien entre l'ONA et les caractéristiques des tempêtes dans cette région, nos résultats confirment l'étude de Lionello et al. (2006) faite sur la Méditerranée, notamment dans le du bassin méditerranéen. Notre étude révèle que les corrélations entre les caractéristiques des tempêtes et l'indice ONA sont en effet significatives (signe négatif), c'est-à-dire que lorsque l'indice ONA est négatif, il y aura plus de dépressions sur la région du Maghreb.

Dans l'analyse des liens de corrélations entre l'ONA, les tempêtes et le régime de précipitation, il a été démontré que l'utilisation d'une période d'étude plus longue que 11 ans (soit de 1979 à 2012 avec les observations E-OBS, Figure 2.21 et 2.22) permet d'obtenir des liens de corrélations, plus significatifs et plus élevés entre l'indice ONA, les caractéristiques des tempêtes et les indices de précipitation, quelque soit la région du Maghreb. Il serait donc pertinent d'utiliser dans de futures analyses, des séries de simulations plus longues afin d'évaluer des liens plus robustes entre les différentes variables. De plus, il serait sans doute pertinent de compléter cette évaluation sur les périodes actuelles et futures (de plus de 10 ans) avec des MRCs pilotés en mode MCG, étant donné la sensibilité du régime de précipitations dans cette région et les forçages de grande échelle versus de l'Atlantique Nord. La capacité des différents MCGs dans les contributions de MRCs proposées par le projet

CORDEX, vis-à-vis de la reproduction de l'indice ONA et de son effet sur la variabilité de la précipitation au Maghreb pourrait aussi être évaluée.

Afin de poursuivre les travaux présentés ici et compléter les connaissances existantes sur la variabilité du régime de précipitation, il serait utile également de compléter cette étude en tenant compte des autres influences connues, à avoir :

(1) Identifier les liens connus entre les anomalies des températures de surface de l'océan le long des côtes du Maghreb et la variabilité des systèmes synoptiques de grandes échelles qui perturbent cette région d'Afrique (tel que suggéré dans les études de Hoerling et al., 2012; Portis et al., 2001; Mariotti, et Dell'Aquila, 2012).

(2) Étudier l'influence de ces liens avec les extrêmes de précipitations et la variation de la température durant la saison humide et sèche.

Par ailleurs, une évaluation des MRCs utilisant comme conditions aux frontières les simulations des MGCs permettrait d'évaluer leurs liens avec les modifications du régime de précipitation, afin notamment d'augmenter le degré de confiance quant à l'utilisation des simulations de MRCs dans les recherches sur le changement climatique en Afrique du Nord. Une analyse avec d'autres simulations utilisant des résolutions plus fines (0.22 ou 0.11) de différents MRCs provenant du projet CORDEX, permettrait également d'évaluer plus en profondeur la valeur ajoutée provenant des simulations à plus haute résolution vis-à-vis des aléas hydrométéorologiques dans cette région d'Afrique.

L'importance de cette étude réside dans le fait qu'elle vient combler un vide, étant donné que jusqu'à présent, il y a eu très peu d'études utilisant les MRCs pour Analyser l'occurrence, la durée et l'intensité de précipitations au Maghreb. Ce travail a évalué la performance des simulations des deux MRCs (MRCC5 et CanRCM4) sur la fenêtre Nord-Africaine. Cette étude peu être utilisé au futur, comme un guide de

régime de précipitation au Maghreb, étant donné qu'elle analyse en détail l'occurrence, la durée et l'intensité de précipitations sur cette région, à partir des données d'observations, des réanalyses, et des simulations des MRCs disponibles. D'autre part, une partie de cette étude analyse rigoureusement les liens existants entre le régime de précipitations et la variabilité de la circulation atmosphérique de grande échelle (tempêtes et l'oscillation Nord-Atlantique) sur différentes régions du Maghreb en utilisant données d'observations, et des simulations des MRCs disponibles.

Remerciements

Nous remercions les soutiens financiers du Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG), et le Centre ESCER (<http://www.escer.uqam.ca/>). Nous remercions aussi les autres soutiens financiers du programme IRIACC-FACE (Initiative de Recherche Internationale sur l'Adaptation aux Changements Climatiques, Faire face aux Changements Ensemble, cf. <http://face.ete.inrs.ca/>). Le programme IRIACC est géré par le CRDI (Centre de Recherches pour le Développement International), cofinancé par le CRDI, les Instituts de recherche en santé du Canada, le CRSH (Conseil de recherches en sciences humaines) et le CRSNG. Nous remercions également le support financier du CRSNG via le projet CNRCWP (Canadian Network for Regional Climate and Weather Processes) et l'accès et la préparation des données par le Centre ESCER et le CCCma.

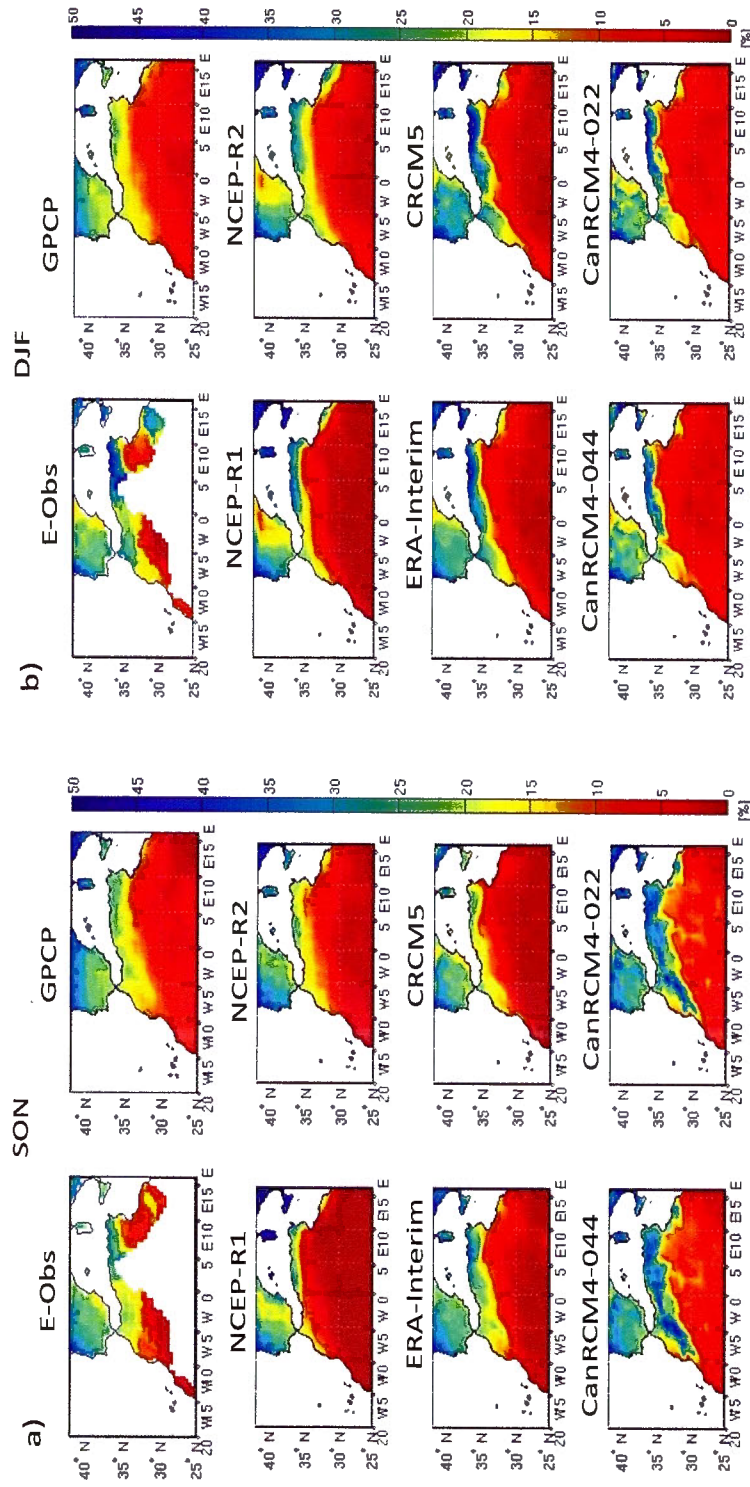


Figure 2.3 Moyennes saisonnières de l'occurrence de jours de pluie (en %, i.e. indice Pr_{cpl} défini au tableau 2.3) sur la période 1998-2008 durant l'automne (SON, panneaux de gauche) et l'hiver (DJF, panneaux de droite), pour les données d'observations (E-OBS, GPCP), les réanalyses (NCEP-R1, NCEP-R2, ERA-Interim), et les modèles (MIRCC5, CanRCM4-044 et CanRCM4-022). Dans les panneaux pour E-OBS les points de grille en blanc représentent les endroits avec des valeurs manquantes.

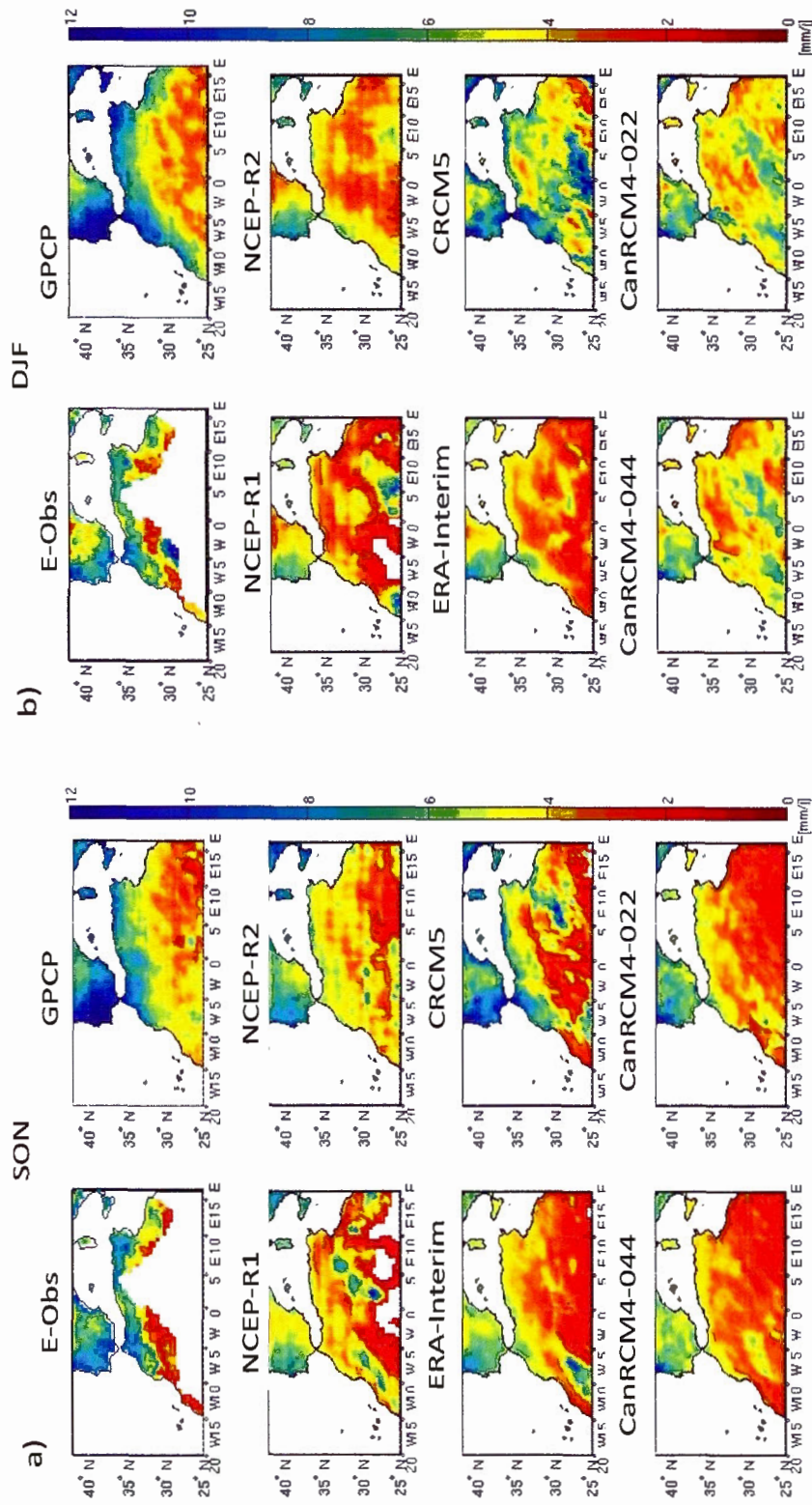


Figure 2.5 Idem à la figure 2.3, mais pour l'intensité moyenne de précipitations par jours humides (en mm/J) définis (seuil ≥ 1 mm cf. SDII défini au tableau 2.3), en automne (panneaux de gauche) et en hiver (panneaux de droite).

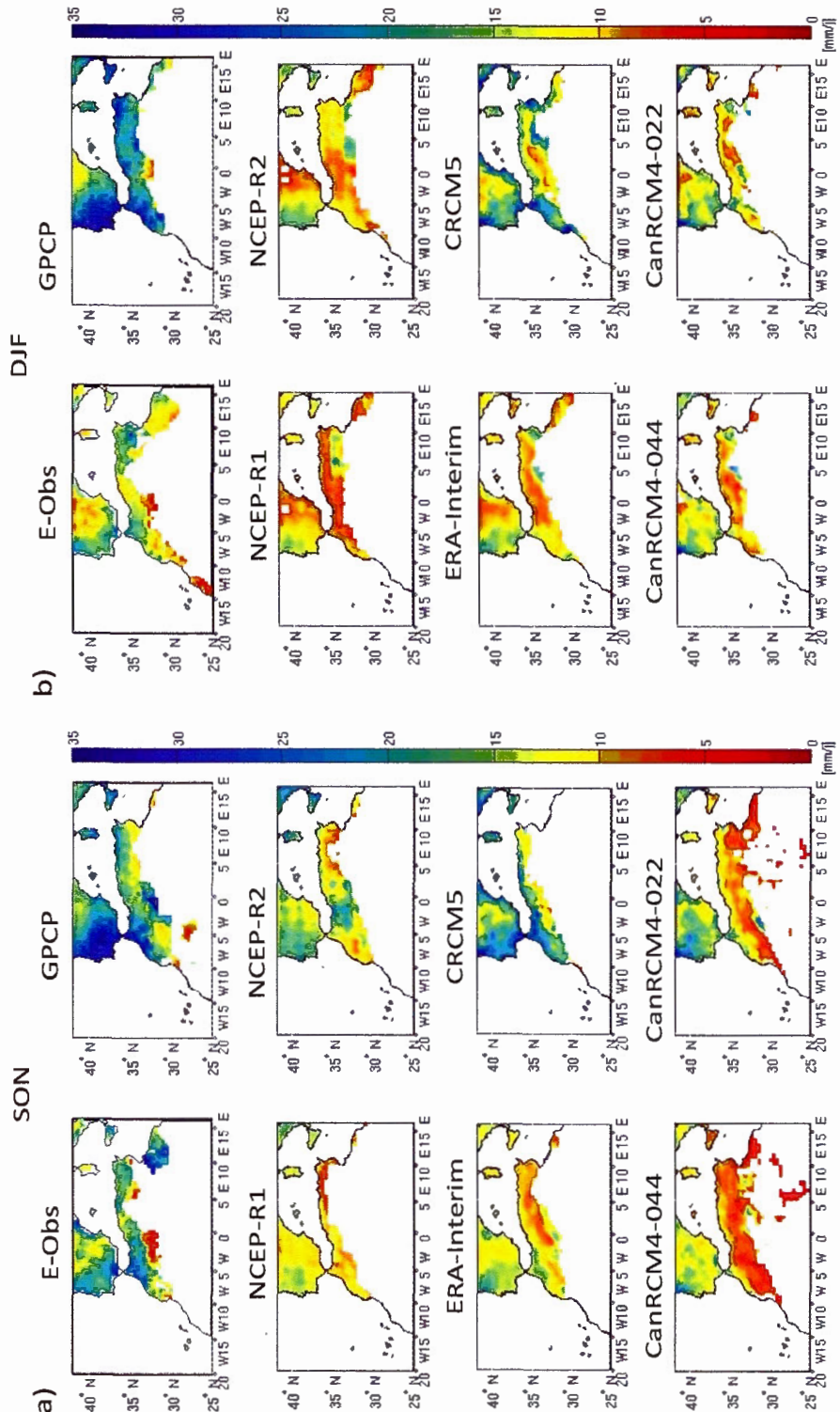


Figure 2.6 Idem à la figure 2.3, mais pour le 90^e centile de précipitations quotidiennes en (mm/J) (cf. Prec90p défini au tableau 2.3), en automne (panneaux de gauche) et en hiver (panneaux de droite).

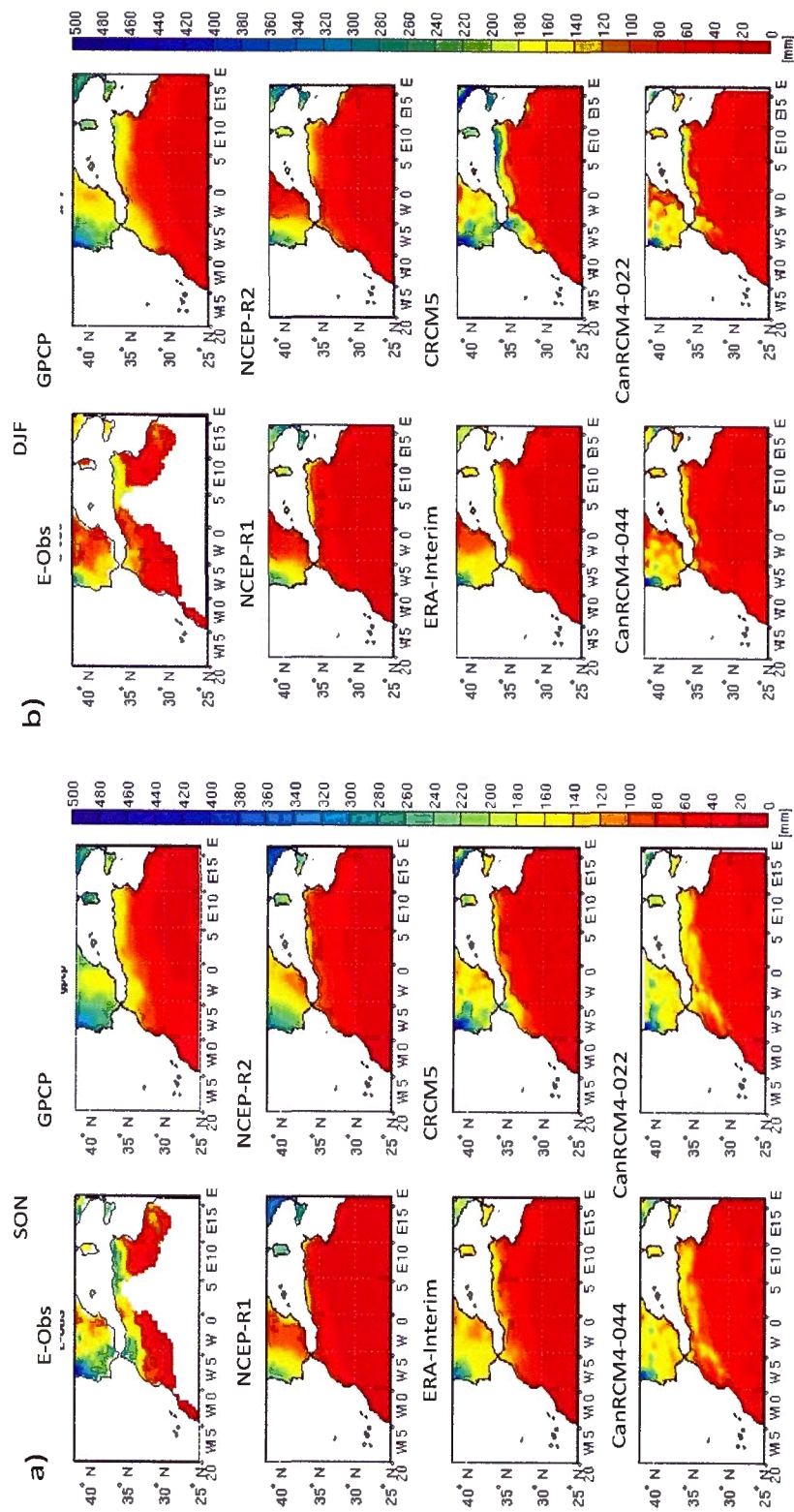


Figure 2.7 Idem à la figure 2.3, mais pour le cumul saisonnier de précipitation (en mm) en automne (panneaux de gauche) et en hiver (panneaux de droite).

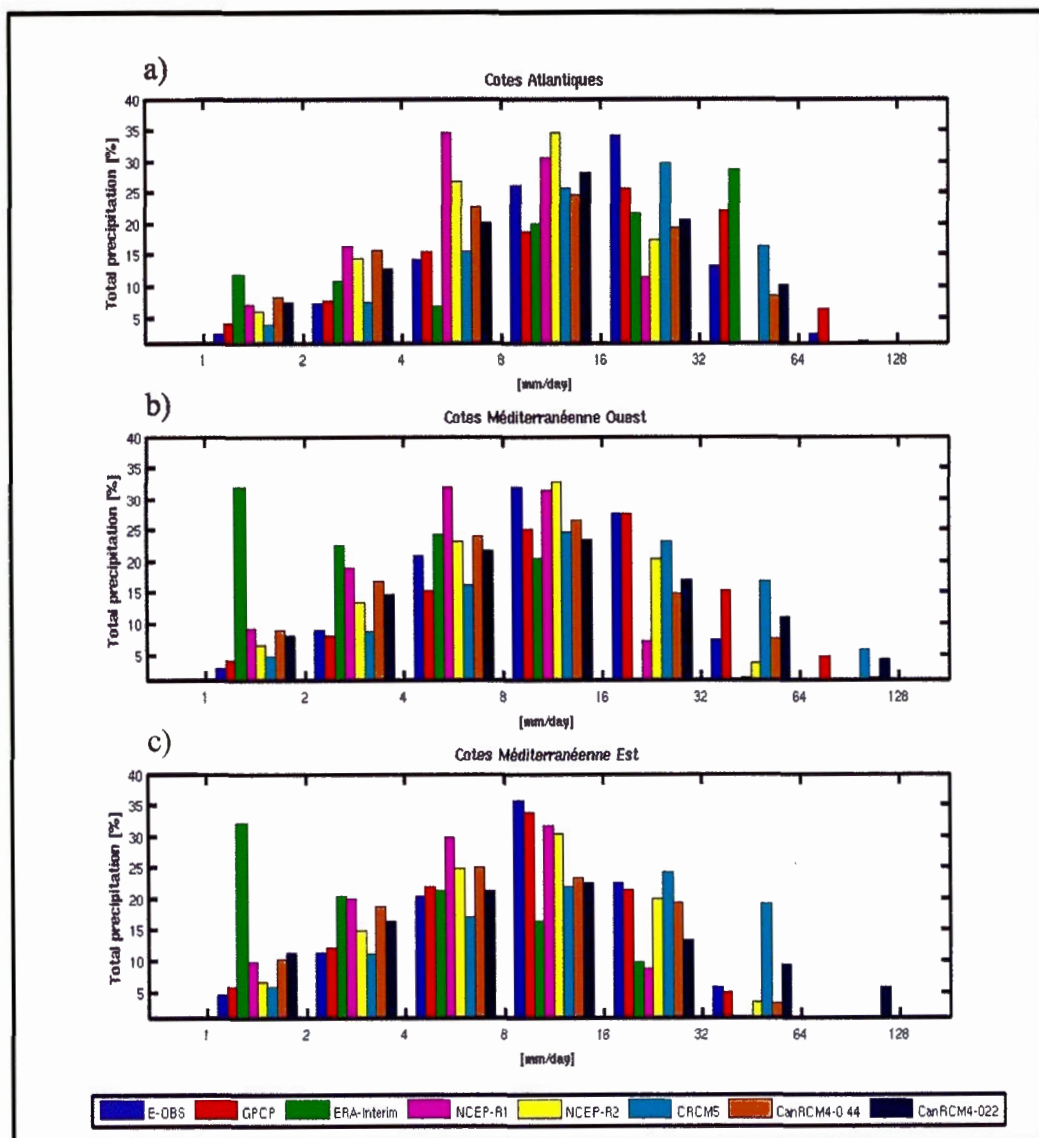


Figure 2.8 Distributions de fréquence de précipitation selon les valeurs d'intensité quotidienne (en mm/jour) sur la période 1998-2008 durant l'automne (SON), à partir des données E-OBS, GPCP, NCEP-R1, NCEP-R2, ERA-Interim, MRCC5, CanRCM4-044 et CanRCM4-022, sur les trois sous-régions du Maghreb (côtes atlantiques, côtes méditerranéennes Ouest, côtes méditerranéennes Est, panneaux du haut en bas, respectivement).

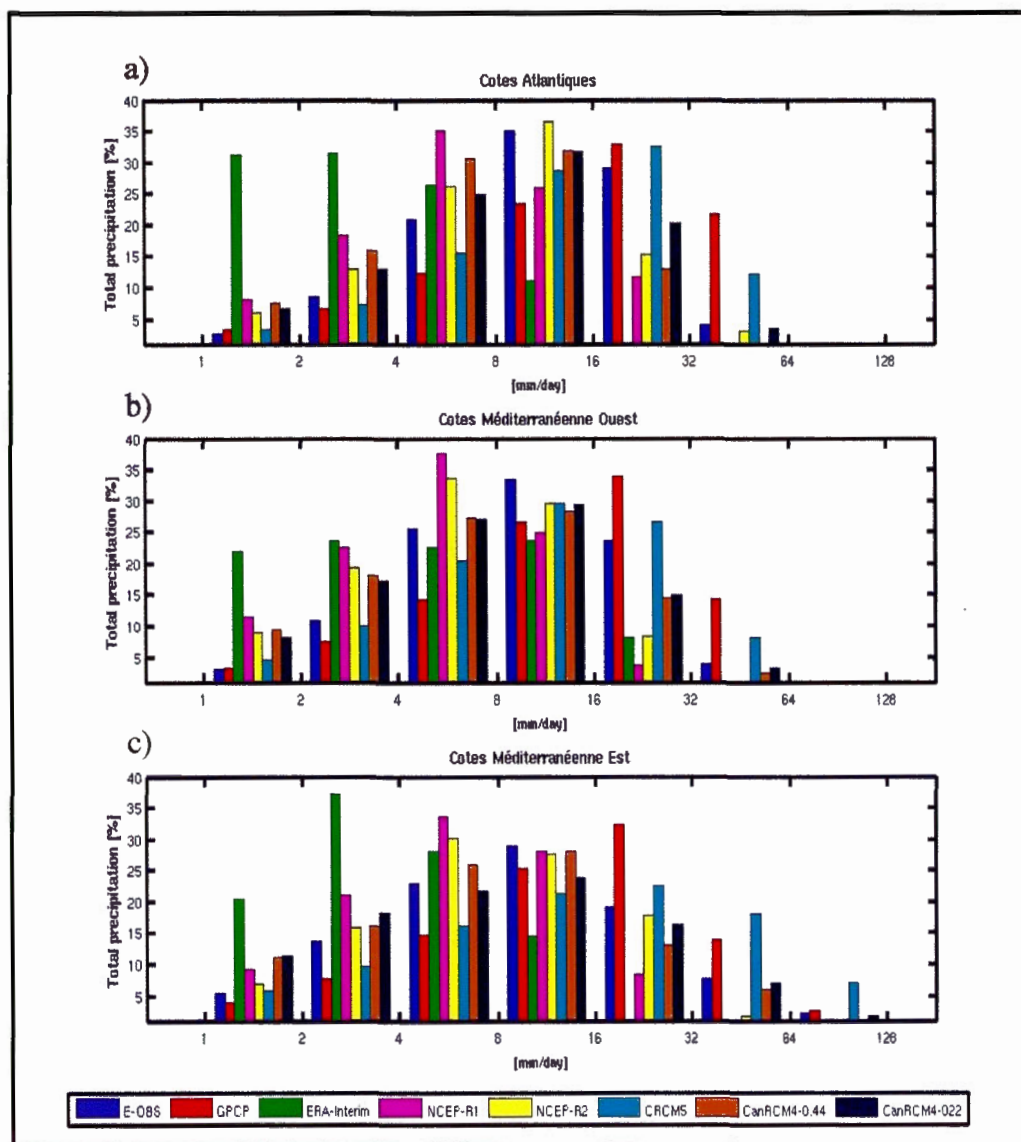


Figure 2.9 Idem à la figure 2.8, mais durant l'hiver (DJF).

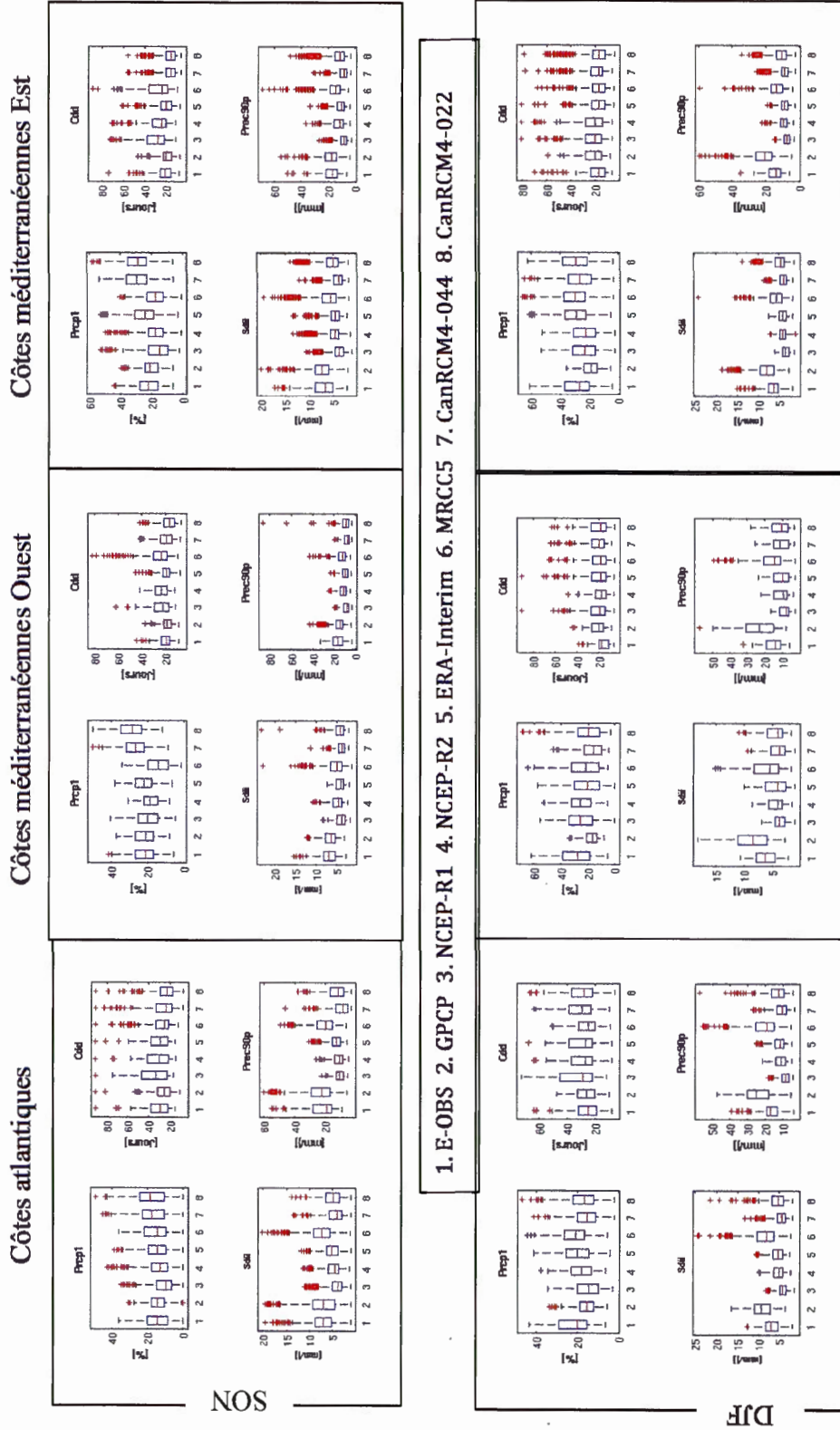
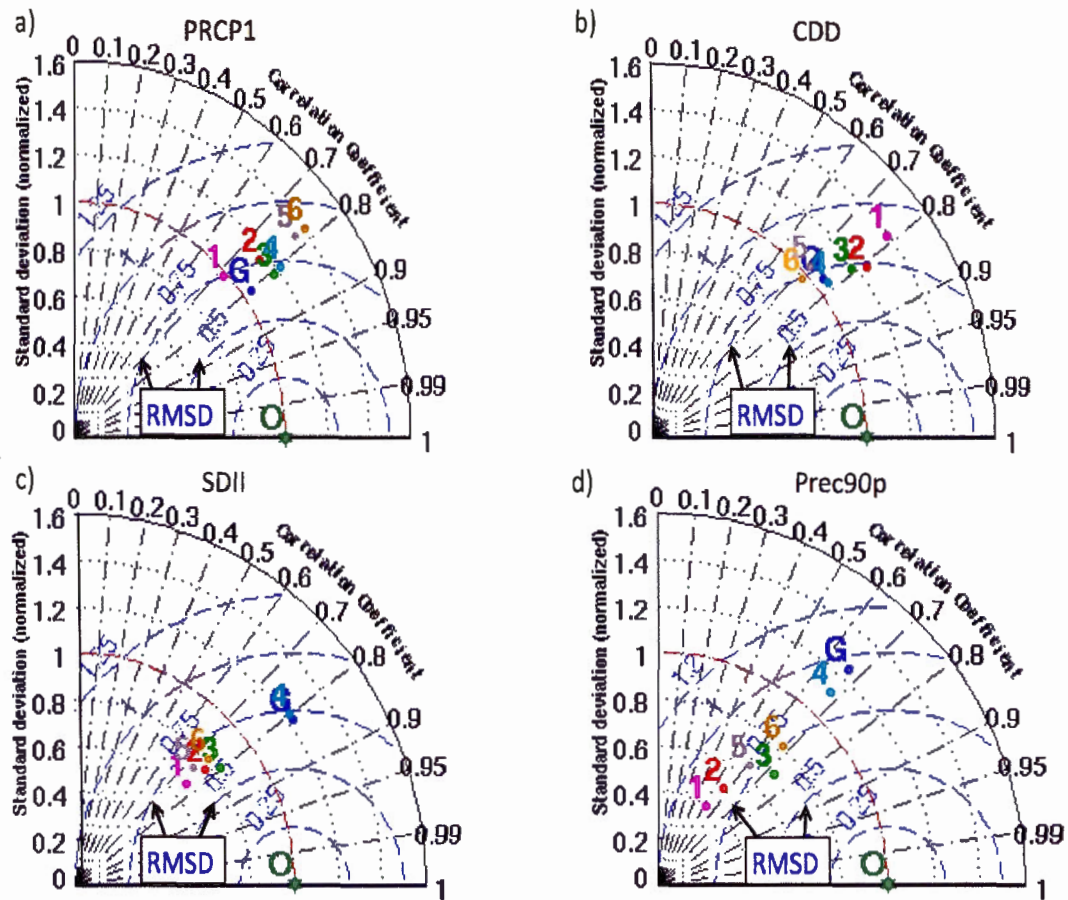


Figure 2.10 Box-plot spatio-temporel des indices climatologiques (Precip1, CDD, SDII et Prec90p) à partir des données E-OBS (1), GPCP (2), NCEP-R1 (3), NCEP-R2 (4), ERA-Interim (5), MRCC5 (6), CanRCM4-044 (7) et CanRCM4-022 (8), sur les trois régions (côtes atlantiques, Côtes méditerranéennes Ouest, Côtes méditerranéennes Est), durant l'automne SON (panneaux du haut) et l'hiver DJF (panneaux du bas), durant la période 1998-2008.



O: E-Obs G: GPCP 1: NCEP-R1 2: NCEP-R2 3: Era-Interim 4: MRCC5 5: CanRCM4-044 6: CanRCM4-022

Figure 2.11 Diagrammes de Taylor spatio-temporel des indices climatologiques de précipitations (Precp1, CDD, SDII et Prec90p) des données E-OBS, GPCP, NCEP-R1, NCEP-R2, ERA-Interim, MRCC5, CanRCM4-044 et CanRCM4-022, sur la période 1998-2008, durant l'automne (SON), sur la région des côtes atlantiques.

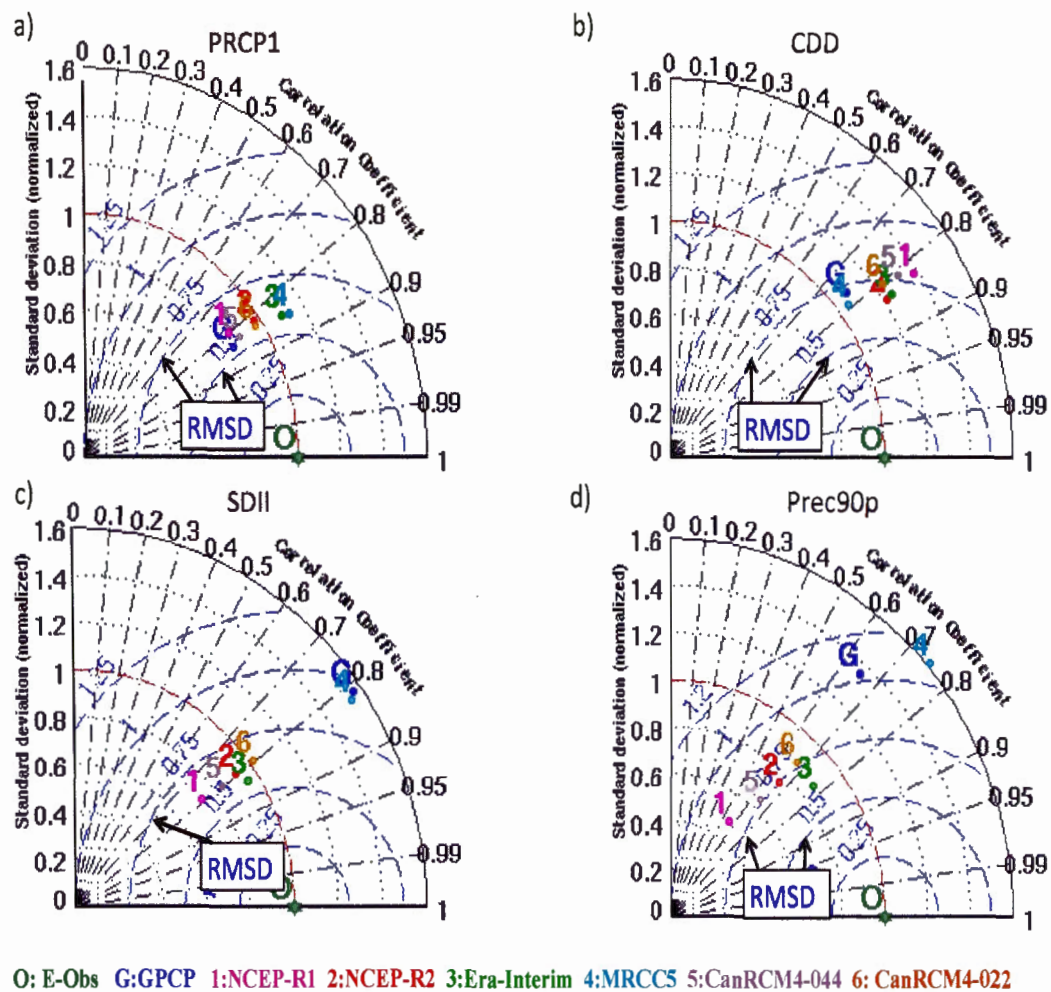


Figure 2.12 Idem à la figure 2.11, mais durant la saison d'hiver (DJF).

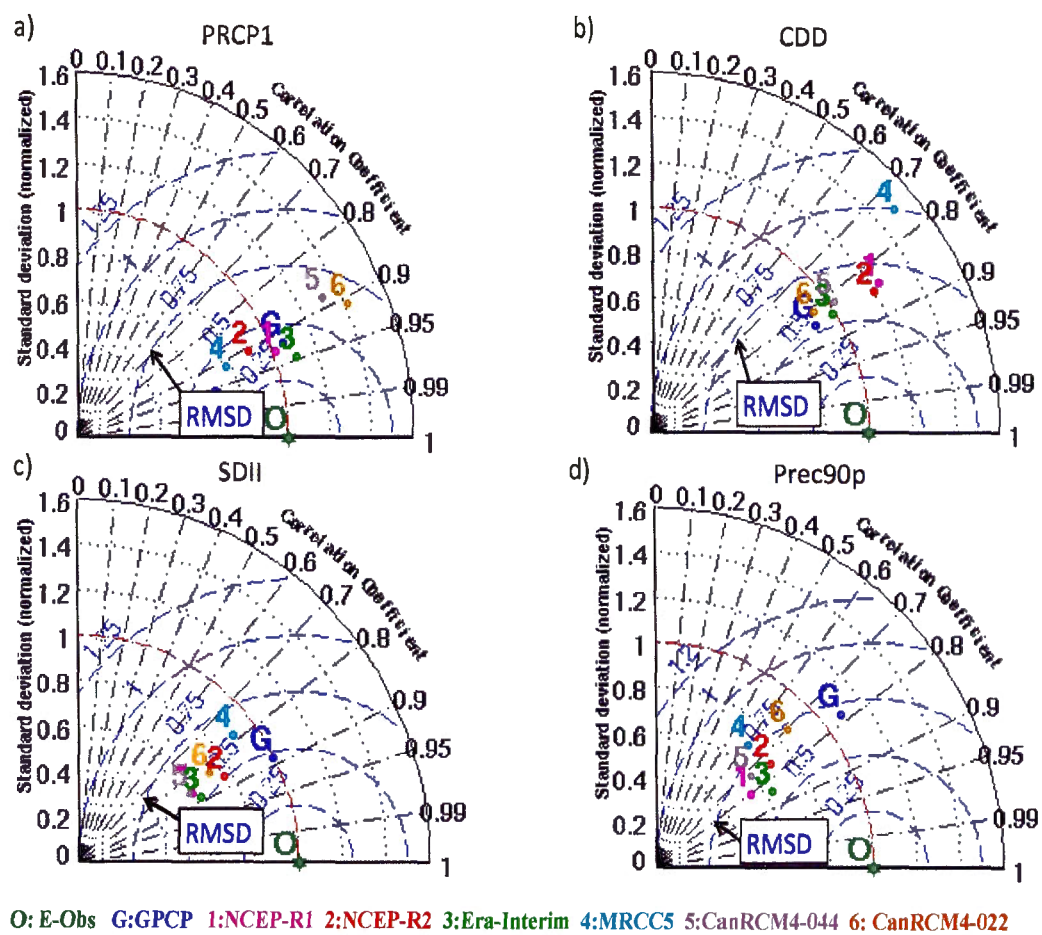
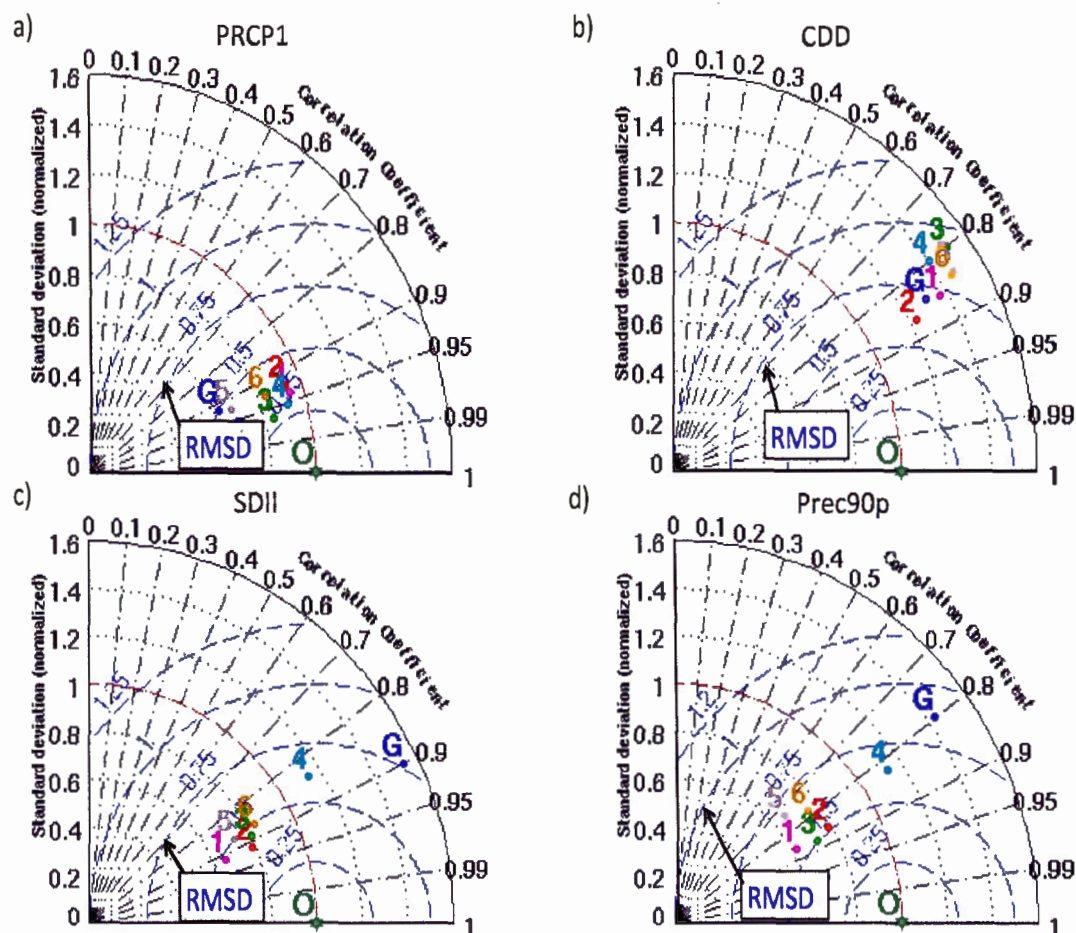


Figure 2.13 Idem à la figure 2.11 mais pour la région des côtes méditerranéennes Ouest.



O: E-Obs G: GPCP 1: NCEP-R1 2: NCEP-R2 3: Era-Interim 4: MRCC5 5: CanRCM4-044 6: CanRCM4-022

Figure 2.14 Idem à la figure 2.13, mais durant la saison d'hiver (DJF).

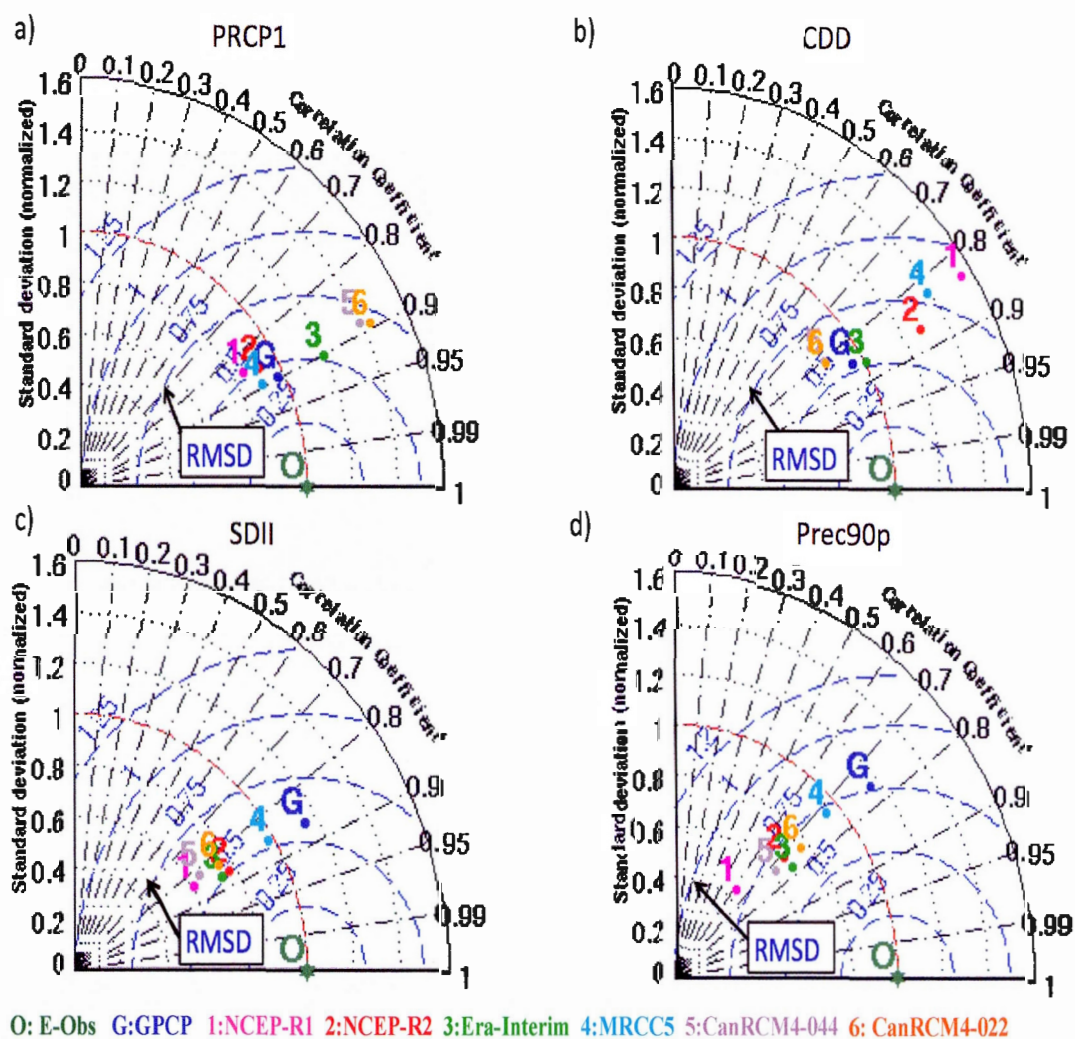


Figure 2.15 Idem à la figure 2.11, mais pour la région des côtes méditerranéennes Est

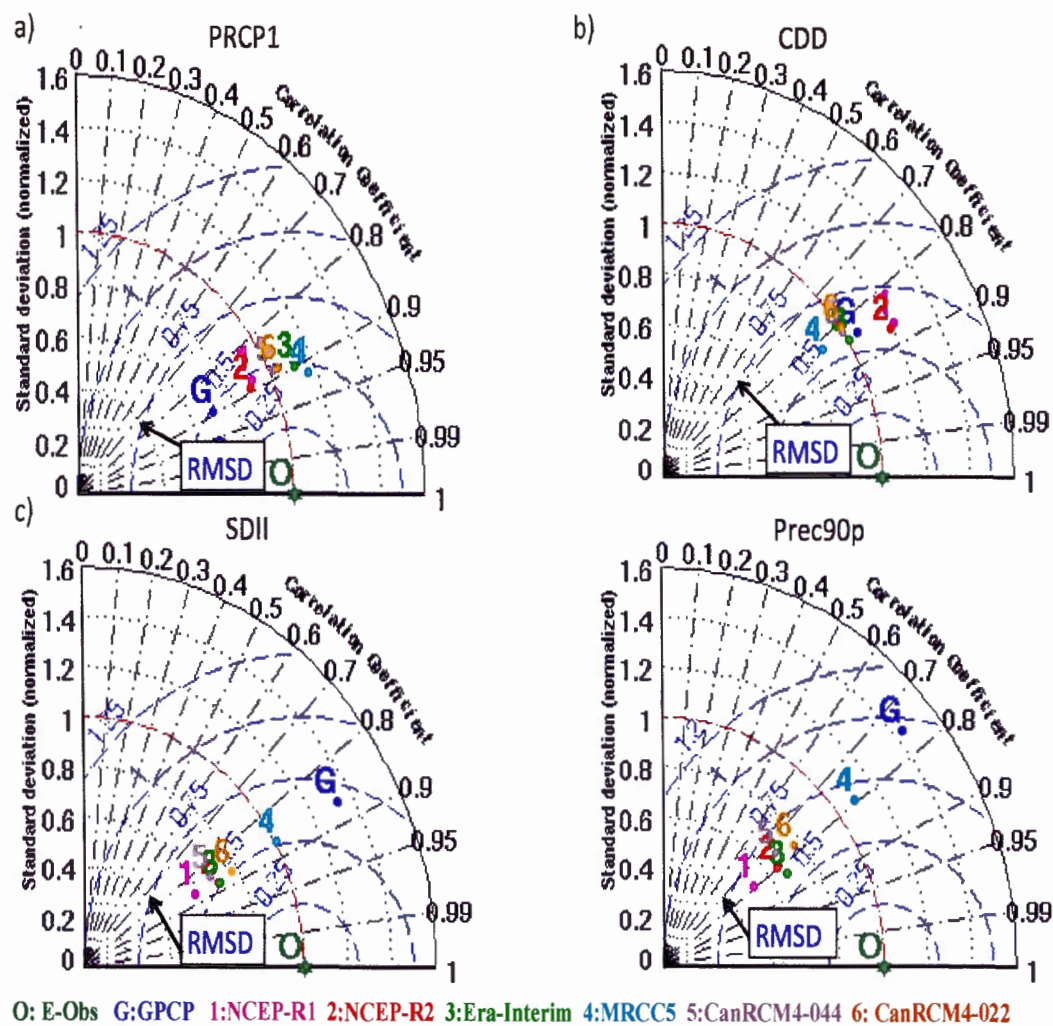


Figure 2.16 Idem à la figure 2.15, mais durant la saison d'hiver (DJF).

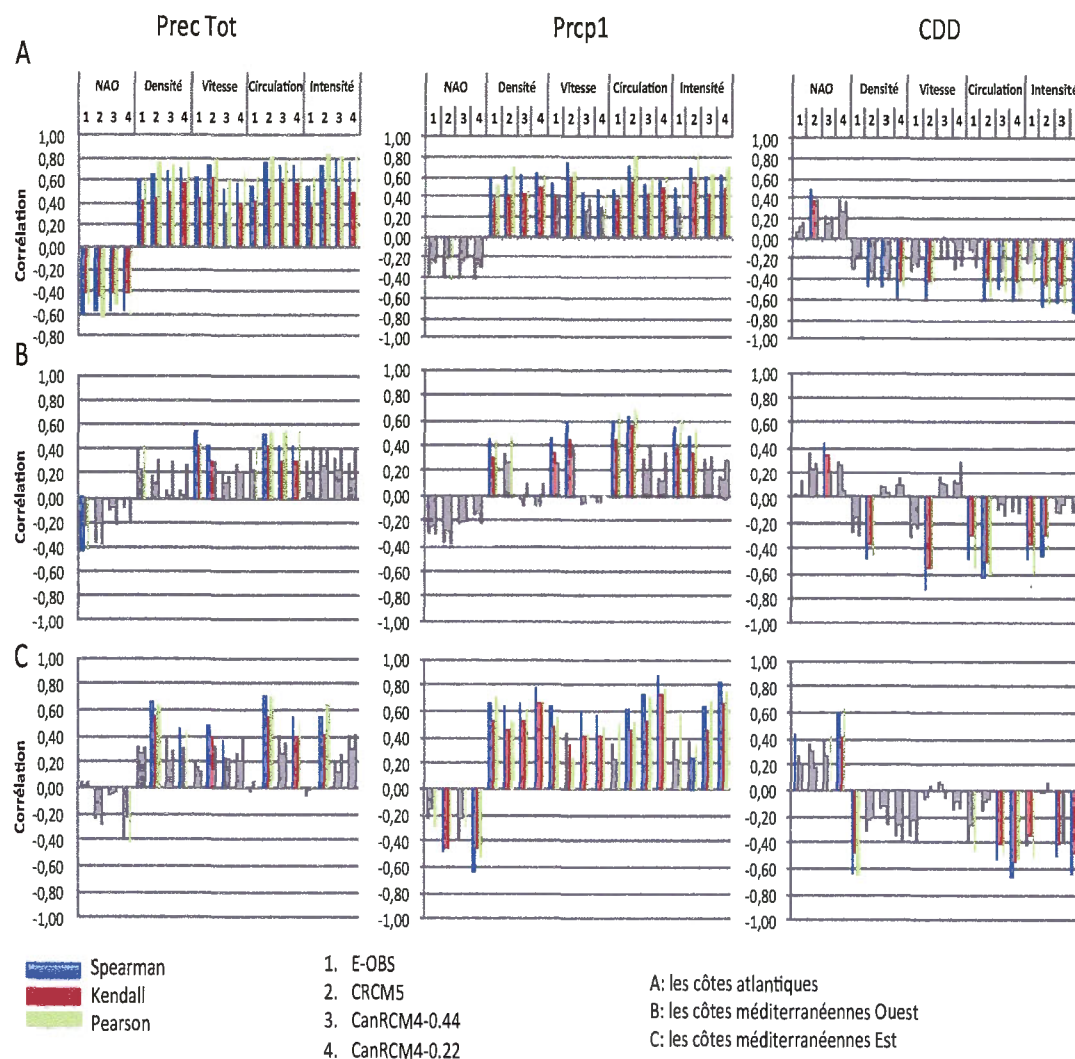


Figure 2.17 Corrélations temporelles utilisant les méthodes de (Spearman, Kendall et Pearson) entre les indices de précipitations (Prec Tot, Prcp1 et CDD) (couleur grise : les corrélations non significatives) calculés à partir des données de précipitations quotidiennes d'E-OBS, MRCC5, CanRCM4-044 et CanRCM4-022, et l'indice ONA ou les caractéristiques des tempêtes (Densité, Vitesse, Circulation et Intensité) durant l'automne (SON) sur la période 1998-2008, selon les régions (A : Côtes Atlantiques, B : Côtes Méditerranéenne Ouest B : Côtes Méditerranéenne Est définies à la figure 2.1 (panneau b)).

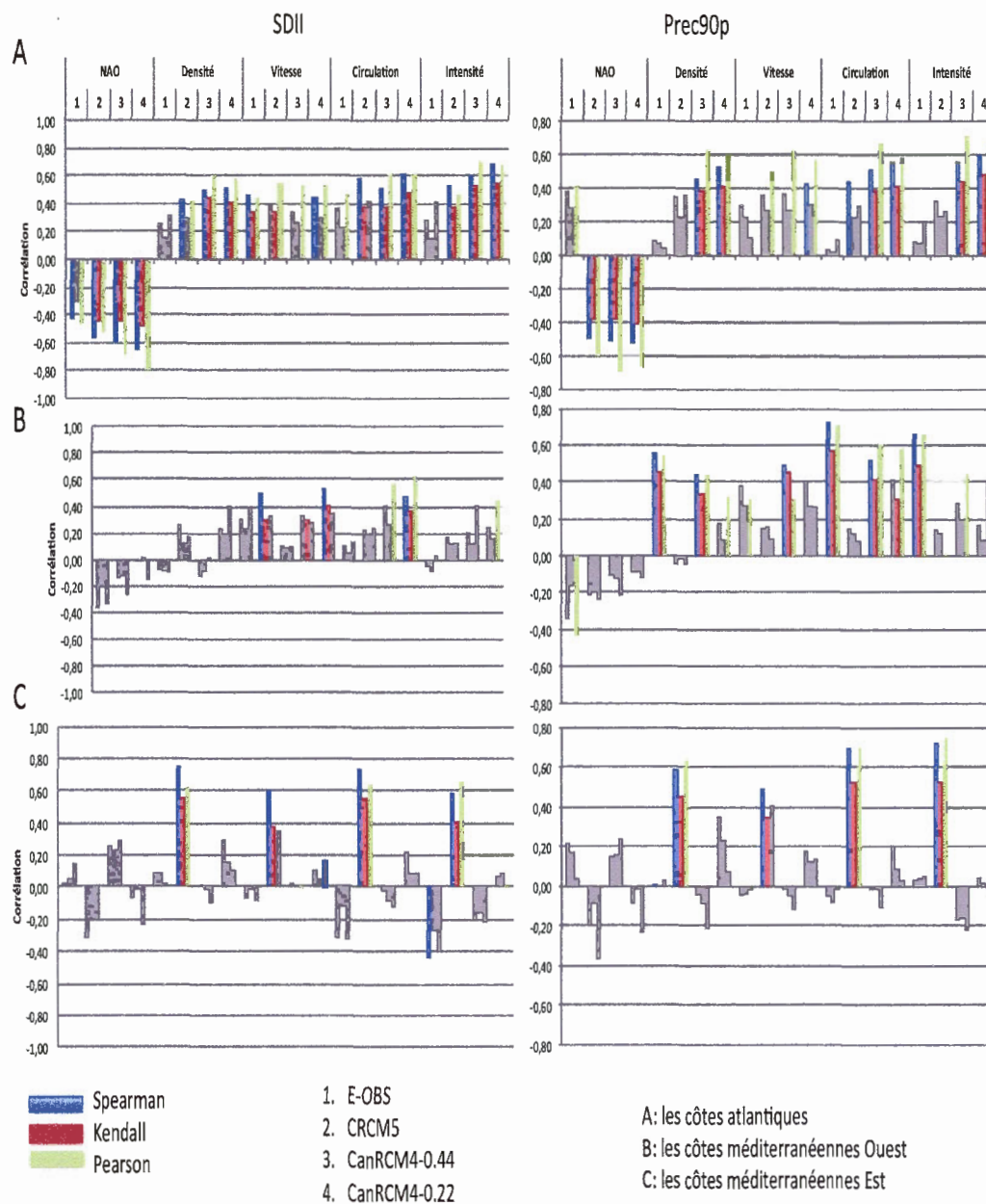


Figure 2.18 Idem à la figure 2.17, mais pour les indices de précipitations (SDII et Prec90p)

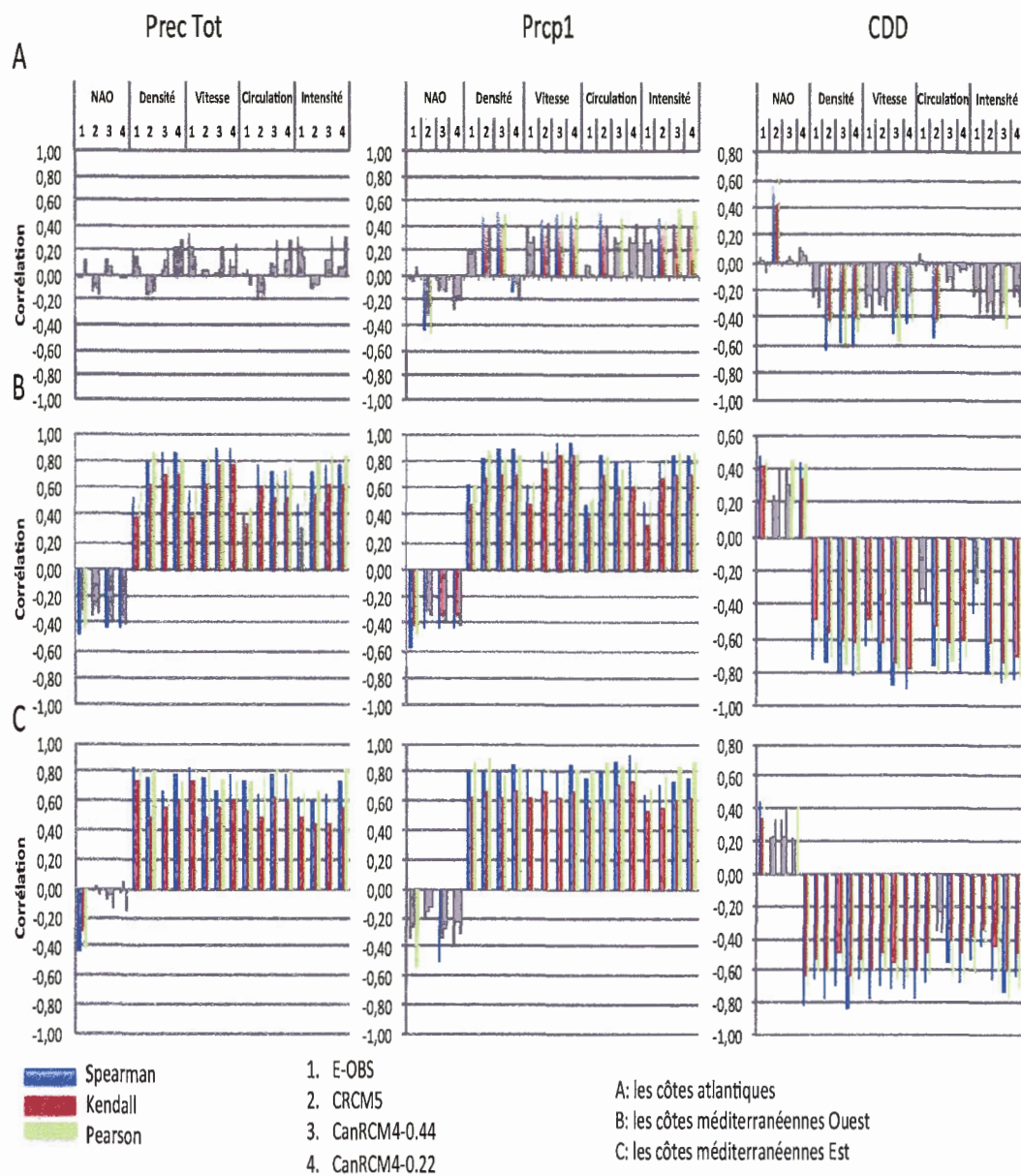


Figure 2.19 Idem à la figure 2.17, mais durant la saison d'hiver (DJF).

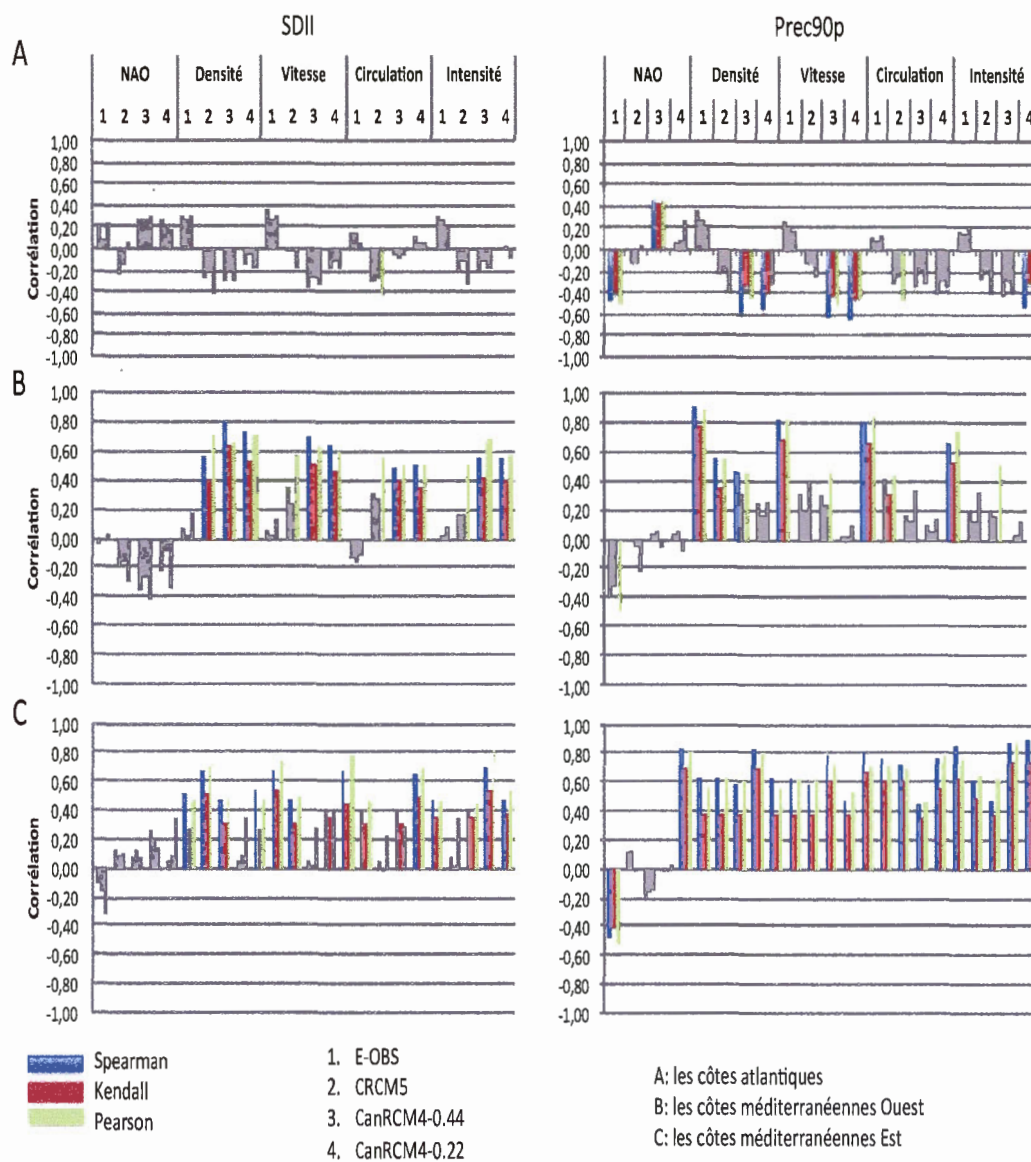


Figure 2.20 Idem à la figure 2.17, mais pour les indices de précipitations (SDII et Prec90p) et durant la saison d'hiver (DJF).

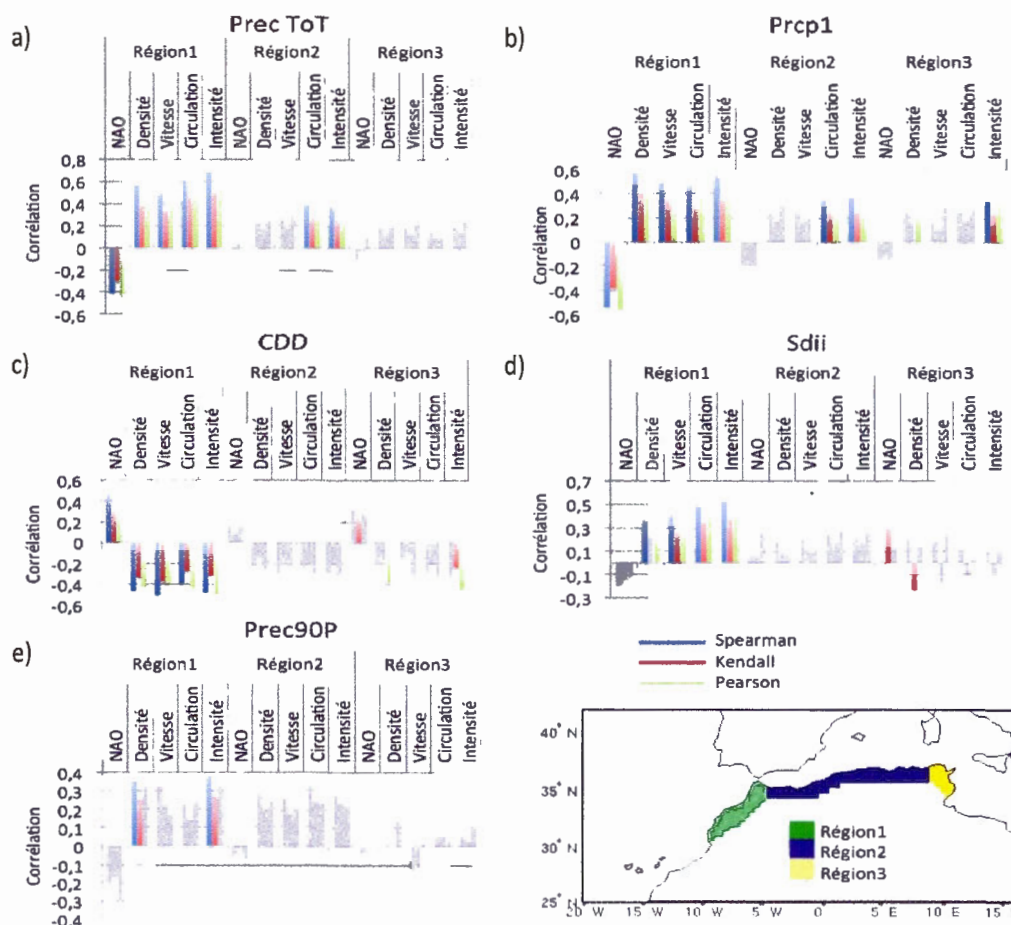


Figure 2.21 Corrélations de (Spearman, Kendall et Pearson) entre les indices de précipitations (Precp1, CDD, SDII et Prec90p, définies au tableau 2.3) et l'indice ONA ou les caractéristiques des tempêtes (Densité, Vitesse, Circulation et Intensité) en SON sur toute la période 1979-2012, pour les observations E-OBS, selon les trois régions définies à la figure 2.1.

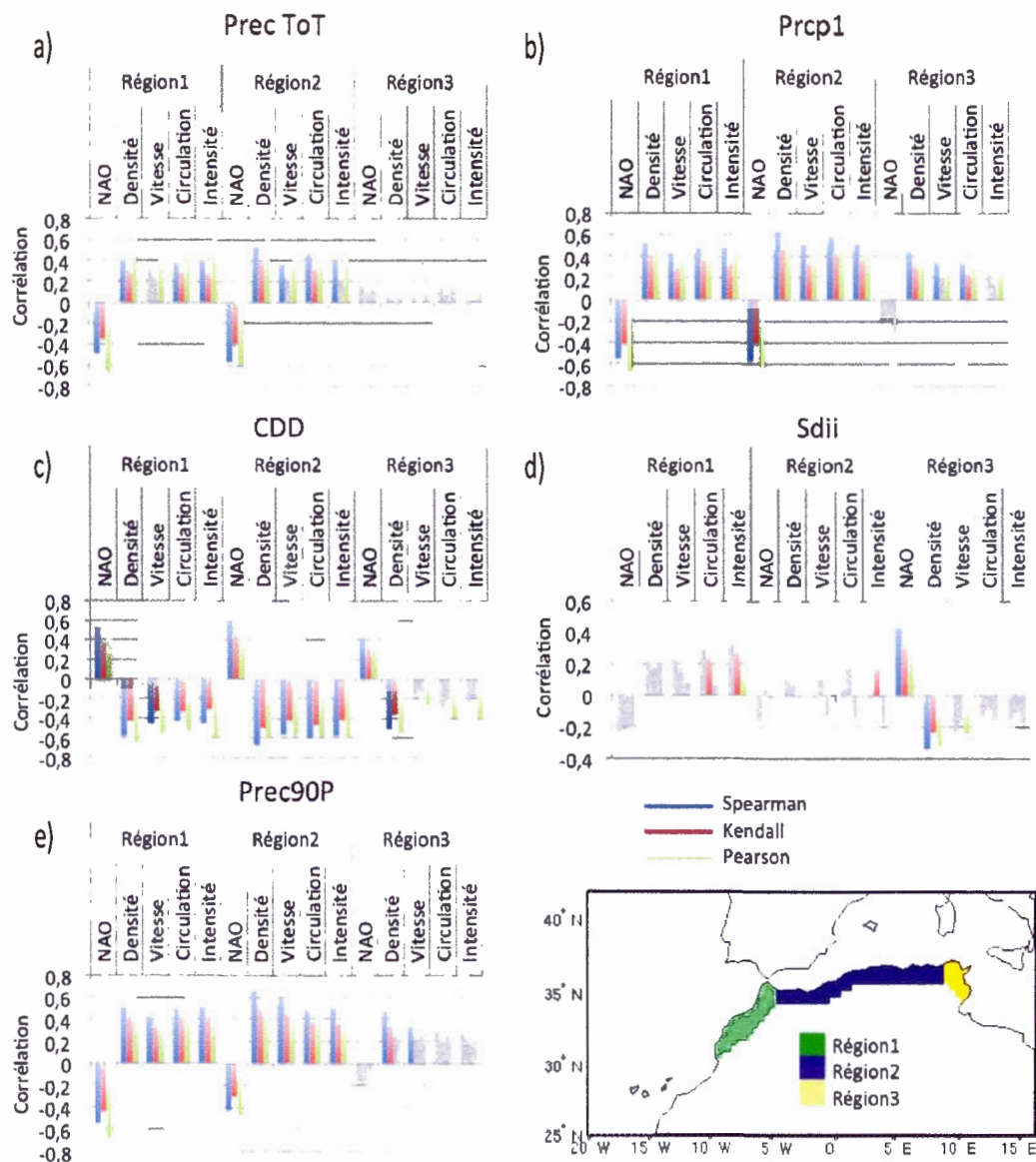


Figure 2.22 Idem à la figure 2.21, mais pour la saison d'hiver (DJF).

CONCLUSION

Cette étude a permis d'évaluer les précipitations simulées sur le Maghreb par deux MRCs (versions récentes de deux modèles canadiens, le CanRCM4 et le MRCC5 développés respectivement par Environnement Canada et le Centre ESCER) qui participent au projet CORDEX. Ces simulations sont pilotées par les réanalyses ERA-Interim sur l'ensemble du continent africain, durant la période de 1998 à 2008. Les simulations analysées ont été réalisées avec une résolution de $0,44^\circ$ pour le MRCC5 et avec deux résolutions de $0,44^\circ$ et de $0,22^\circ$ pour le CanRCM4. Les données d'observation sous forme de grille utilisées pour la validation des trois différentes simulations sont disponibles à différentes résolutions (ex. E-OBS et GPCP), donc une interpolation préalable de ces données de référence sur la grille des simulations à $0,44^\circ$ a été réalisée, ainsi que pour les réanalyses (i.e., NCEP-R1, NCEP-R2 et ERA-Interim).

À partir des observations, des réanalyses et des simulations des MRCs, la caractérisation du régime de précipitations au Maghreb durant les deux saisons pluviales d'automne et d'hiver a été réalisée à l'aide des distributions statistiques des indices de précipitations (occurrence des jours de pluie, durée des séquences sèches et intensités moyennes et fortes des précipitations par jours humides). Ce travail a également permis de caractériser les liens entre les téléconnexions à l'échelle synoptique et le régime de précipitations automnal et hivernal, à partir des anomalies de l'Oscillation de l'Atlantique Nord (ONA) établies à partir des données observées aux stations (fournies par Osborn et al., 1999) et les caractéristiques de tempêtes au-dessus du bassin méditerranéen (reconstituées à partir des réanalyses globales

NCEP_DOE (NCEP-R2)).

Globalement, la forte variabilité spatiale dans le régime de précipitations au Maghreb, avec une diminution marquée du nombre de jours de pluie et des quantités de précipitation depuis les côtes vers l'intérieur des terres, est en général bien reproduite par les MRCs par rapport aux observations. Cependant, les observations GPCP surestiment les intensités moyennes et élevées, et sous-estiment la fréquence de jours de pluie. Par ailleurs, les réanalyses NCEP-R1, NCEP-R2 et ERA-Interim sous-estiment le plus souvent les précipitations quotidiennes. Quant aux MRCs, le modèle MRCC5 reproduit relativement bien l'occurrence de précipitation, peu importe la région. Par contre, le modèle CanRCM4 surestime le nombre de jours de pluie, surtout dans les régions désertiques en bordure du Sahara.

Lorsqu'on analyse en détail les différents produits selon les trois secteurs suivants, côtes atlantiques, côtes méditerranéennes Ouest et Est, et selon la saison, les principales conclusions sont les suivantes :

- En automne : l'occurrence de précipitations est bien reproduite par les données GPCP et les réanalyses ERA-Interim sur les trois régions du Maghreb, mais cet indice de précipitation est sous-estimé par les NCEPs (NCEP-R1/R2). Cependant, l'intensité et les extrêmes de précipitations sont bien reproduits par les données GPCP sur les côtes atlantiques et méditerranéennes Ouest, par contre, les réanalyses (NCEPs et ERA-Interim) les sous-estiment, quelle que soit la région. D'autre part, pour les modèles régionaux, le MRCC5 reproduit assez bien l'occurrence de précipitation, le nombre maximal de jours secs consécutifs, sur les côtes atlantiques. De plus, ce MRC semble relativement bien reproduire les intensités de précipitations sur les côtes atlantiques et les côtes méditerranéennes Ouest. Par contre, le CanRCM4 surestime systématiquement, quelle que soit la région,

l'occurrence de précipitations et sous-estime le plus souvent les précipitations modérées à intenses et les séquences sèches.

- En hiver : Les réanalyses ERA-Interim reproduisent bien l'occurrence de jours de pluie, sur les côtes atlantiques, par contre, les observations GPCP et les réanalyses NCEPs tendent à sous-estimer cet indice de précipitations. Cependant, les intensités modérées et extrêmes de précipitations sont surestimées par les données GPCP et sous-estimées par les données ERA-Interim et NCEPs. D'autre part, pour les modèles régionaux, le MRCC5 reproduit relativement bien l'occurrence des jours de pluie et les séquences sèches sur les côtes du Maghreb. Par contre, le modèle CanRCM4 ne reproduit l'occurrence observée des jours de pluie et les séquences sèches que sur les côtes méditerranéennes Est. Cependant, le modèle MRCC5 simule adéquatement les intensités modérées et fortes de précipitation sur les deux côtes méditerranéennes, il tend à les surestimer ailleurs. Cependant, les simulations du CanRCM4 sous-estiment, peu importe la résolution utilisée, les intensités modérées et fortes de précipitation.

L'étude des liens entre l'ONA et les tempêtes qui affectent le régime de précipitations dans la région du Maghreb à partir des données observées et des réanalyses montre que la diminution de l'indice ONA est statiquement reliée à l'augmentation de la densité de tempête dans cette région, durant les deux saisons pluvieuses. Concernant le lien entre l'indice ONA et le régime de précipitation, cet indice n'a pas la même influence sur chaque région et pour chaque indice de précipitation. Selon le secteur et la saison, ces liens sont relativement bien reproduits par les simulations des MRCs, nommément :

- En automne : l'occurrence de précipitations augmente lorsque la densité, l'intensité et la circulation moyenne des tempêtes et la vitesse du vent augmentent sur les côtes atlantiques et les côtes méditerranéennes Est. Ce

lien s'affaiblit sur les côtes méditerranéennes Ouest (corrélations faibles et non significatives). L'intensité de précipitations quotidiennes augmente, sur les côtes Atlantiques, lorsque la densité, l'intensité et la circulation moyenne des tempêtes et la vitesse du vent augmentent, ce lien diminue sur les côtes méditerranéennes. D'autre part, la diminution de l'indice ONA est statistiquement associée à l'augmentation de l'intensité des précipitations, sur les côtes atlantiques.

- En hiver : L'augmentation de la densité, l'intensité et la circulation moyenne des tempêtes et la vitesse du vent favorisent l'augmentation de l'occurrence de précipitations et de cumuls pluviaux sur les deux régions Ouest et est méditerranéennes. L'augmentation de l'occurrence de tempêtes favorise notamment l'augmentation d'intensité modérée et extrême des précipitations sur les côtes tunisiennes. D'autre part, la diminution de l'indice ONA est statistiquement associée à l'augmentation de l'occurrence des précipitations, sur les côtes méditerranéennes.

Malgré une bonne capacité générale des MRCs à reproduire le cumul saisonnier (automne et hiver) de la précipitation sur l'ensemble du Maghreb, les modèles analysés éprouvent plus de difficultés à simuler adéquatement les occurrences et les fortes intensités de précipitation, ainsi que la persistance des séquences sèches selon les secteurs (côtiers versus intérieur des terres), surtout le CanRCM4 peu importe la résolution utilisée. Cette relative déficience a été également mise en évidence ailleurs en Afrique Sahélienne (Diaconescu et al., 2014).

L'ensemble des conclusions obtenues avec les MRCs devrait être confirmé sur une période d'analyse plus longue (climatologique s'étendant sur 30 ans) compte tenu du fait que les liens établis avec les téléconnexions, les caractéristiques de tempêtes et le régime de précipitations dépendent en grande partie de la période d'analyse

considérée (longueur et alternance interannuelle et décennale des phases sèches ou humides). En effet, les analyses réalisées en utilisant les observations et les réanalyses sur une période d'au moins trente ans montrent que les liens de corrélation augmentent, que ce soit en automne ou en hiver et selon les secteurs, entre l'indice ONA, les caractéristiques des tempêtes et les indices de précipitations (cf. Annexe D), par rapport à l'usage d'une période plus courte comme utilisée avec les MRCs (i.e. compte tenu de la disponibilité des données de simulations).

Ce travail a permis de confirmer également qu'il y a un lien entre l'indice ONA et les tempêtes au Sud du bassin méditerranéen, comme suggéré dans l'étude de Lionello et al. (2006) faite sur la Méditerranée. De plus, les corrélations entre les caractéristiques des tempêtes et l'indice ONA sont significatives, mais de signe négatif, c'est-à-dire que lorsque l'indice ONA est négatif, les tempêtes seront plus fréquentes sur la région du Maghreb.

L'analyse des liens entre le régime de précipitations au Maghreb et l'ONA a aussi prouvé que la diminution de l'indice ONA est statiquement reliée à l'augmentation du régime de précipitations, tel que démontré par Belaassal (1998), Xoplaki (2002) et Matti et al. (2009). Toutefois, les études de Barkhordarian et al. (2013), Hoerling et al. (2012) et Martin-Vide et al. (2006) concluaient que la sécheresse observée au Maghreb en hiver ne pouvait pas être attribuée à une variation observée du comportement de l'indice ONA. Cependant, notre étude suggère plutôt que l'intensité de précipitation est affectée par l'ONA, sur les côtes atlantiques, en automne, les anomalies négatives de l'indice ONA engendrent une augmentation de l'intensité de précipitation dans cette région. Également, l'occurrence de précipitations et les séquences sèches sont affectées par l'ONA, sur les côtes méditerranéennes, en hiver, les anomalies négatives de l'indice ONA engendrent une augmentation de l'occurrence de précipitations et diminution des séquences sèches dans cette région. Cette étude a démontré également l'existence, d'un lien entre le

régime de précipitations au Maghreb et la densité, l'intensité et la circulation moyenne des tempêtes ainsi que la vitesse du vent des tempêtes.

Cette étude devrait être poursuivie afin d'évaluer plus précisément les liens connus entre les anomalies des températures de surface de l'océan le long des côtes atlantiques, voire méditerranéennes (Hoerling et al., 2012), ainsi que les liens établis avec les systèmes synoptiques ou les types de temps en développement dans certains secteurs de la Méditerranée (Portis et al., 2001; Mariotti, et Dell'Aquila, 2012), de même que des mécanismes de grande échelle reliés à l'alternance de phases sèches et humides au Maghreb (Martin-Vide et al., 2006; Trambly et al., 2013). Il serait également pertinent de prendre en compte de l'indice ONA dans les simulations des MCGs. De plus, une évaluation des MRCs utilisant comme conditions aux frontières les simulations des MCGs permettrait d'évaluer si les mécanismes de grande échelle identifiés ici sont ou non reproduits par les MCGs ainsi que leurs liens avec les modifications du régime de précipitation. Ceci serait de nature à augmenter le degré de confiance quant à l'utilisation des simulations de MRCs dans les recherches sur le Changement climatique et les impacts associés dans cette région d'Afrique. Une analyse avec d'autres simulations provenant du projet CORDEX serait également à privilégier dans ce cas.

Cette étude est inédite puisqu'elle a utilisé les simulations des deux MRCs (MRCC5 et CanRCM4) afin d'analyser l'occurrence, la durée et l'intensité de précipitations au Maghreb. De plus, les études des simulations des MRCs qui se sont intéressées à étudier l'occurrence, la durée et l'intensité des précipitations quotidiennes du climat actuel ou futur sont peu nombreuses, voire inexistantes. Ce travail a évalué la performance des simulations de régime de précipitations des MRCs (MRCC5 et CanRCM4) dans la région du Maghreb, à partir de la comparaison avec des données d'observations et des réanalyses. Dans l'avenir, ce travail peut-être

utilisé comme référence afin d'étudier la forte variabilité spatiale dans le régime de précipitations au Maghreb.

ANNEXE A

CONTEXTE SOCIO-ÉCONOMIQUE

Tableau A.1 Contexte socio-économique au Maghreb. (Source : Statistiques mondiales, cf. www.statistiques-mondiales.com).

	Maroc	Algérie	Tunisie
Superficie (Km ²)	710 850	2 381 741	163 610
Démographie	32,3 millions d'habitants	37,9 millions d'habitants	10,7 millions d'habitants
Agriculture (secteur primaire)	16,5	8,9	8,9
Industrie (Secteur secondaire)	32,2 % (phosphate)	60,9 % (hydrocarbure, gaz naturel)	29,6 % (phosphate)
Services (Secteur tertiaire)	51,4 % (tourisme)	30,2 %	61,5 % (tourisme)

ANNEXE B

CONTEXTE CLIMATOLOGIQUE

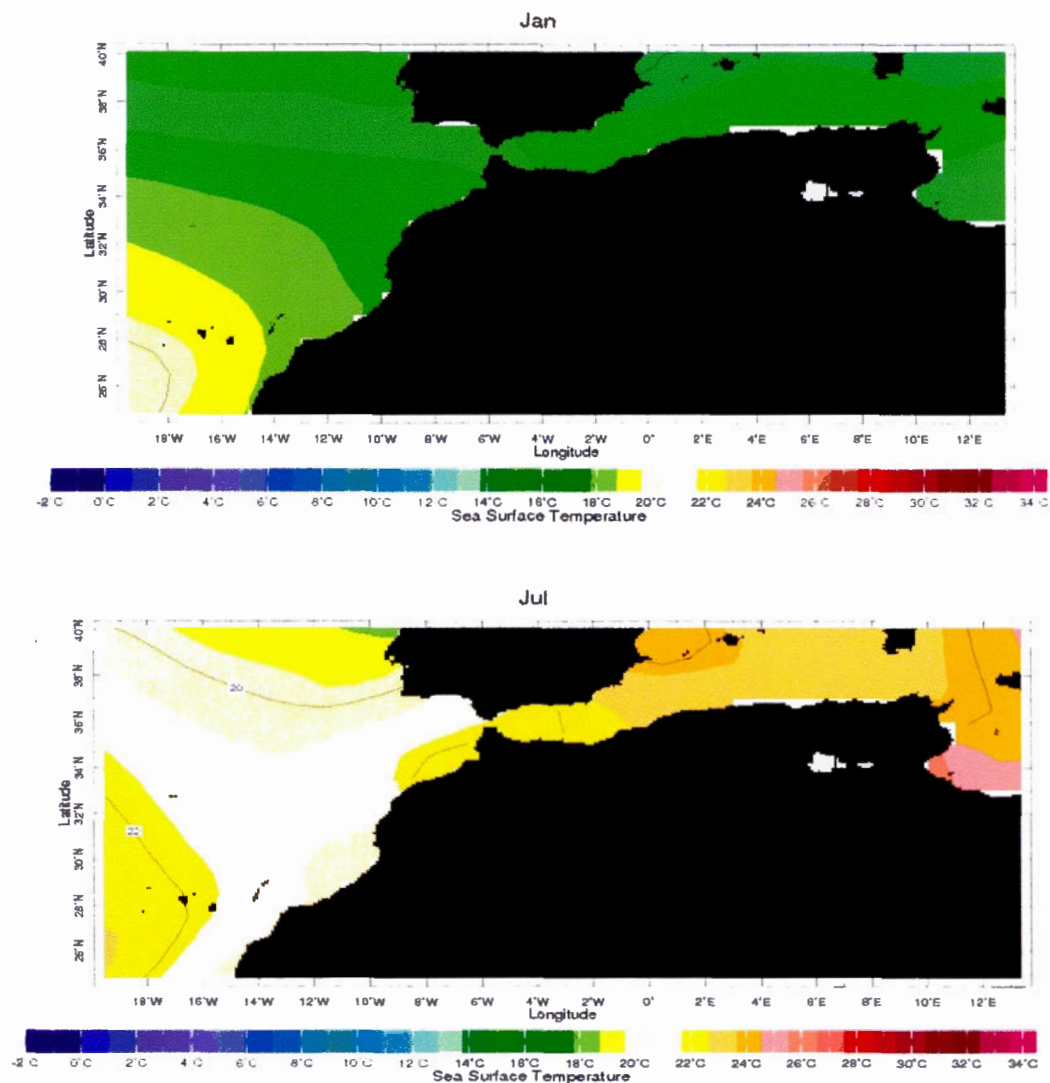


Figure B.1 Température moyenne mensuelle de surface de la mer (en °C) durant les mois de janvier (panneau du haut) et de juillet (panneau du bas), valeur climatologique calculée sur la période 1971-2000 à partir de données Reynolds et Smith OISST Version 2. (Source : http://iridl.ldeo.columbia.edu/maproom/Global/Climatologies/SST_Loop.html?bbox=bb:-20:-40:55:40:bb&T=Aug)

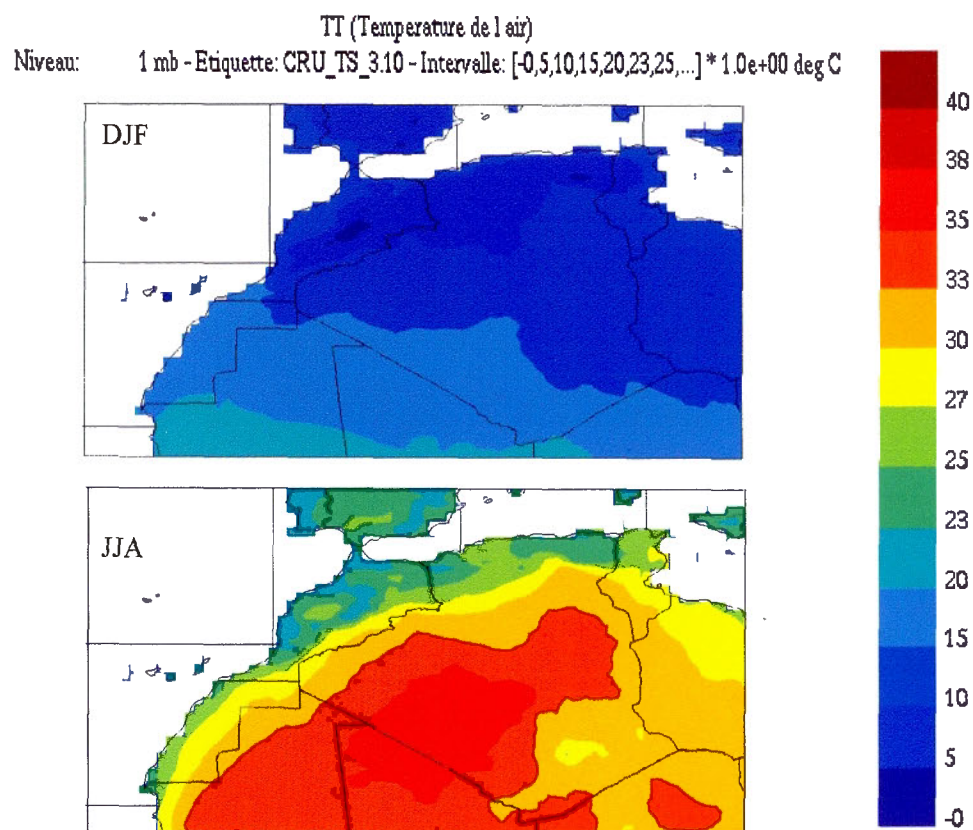


Figure B.2 Température moyenne saisonnière (en °C) au Maghreb en hiver (DJF) et été (JJA), valeur climatologique calculée sur la période 1971-2000 à partir des données du CRU (Climate Research Unit, Source : <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/hrg/>).

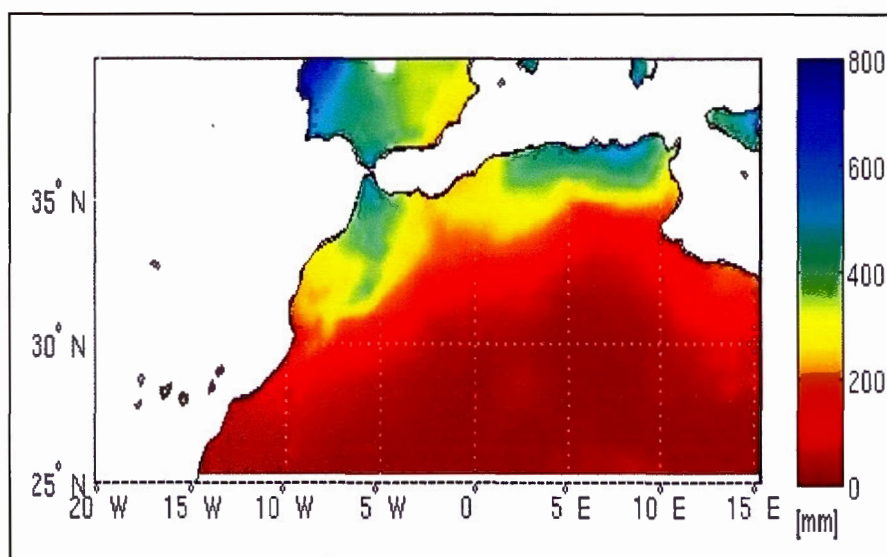


Figure B.3 Précipitation annuelle moyenne (en mm) au Maghreb, valeur climatologique calculée sur la période 1971-2000 à partir des données du CRU (Climate Research Unit, Source : <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/hrg/>).

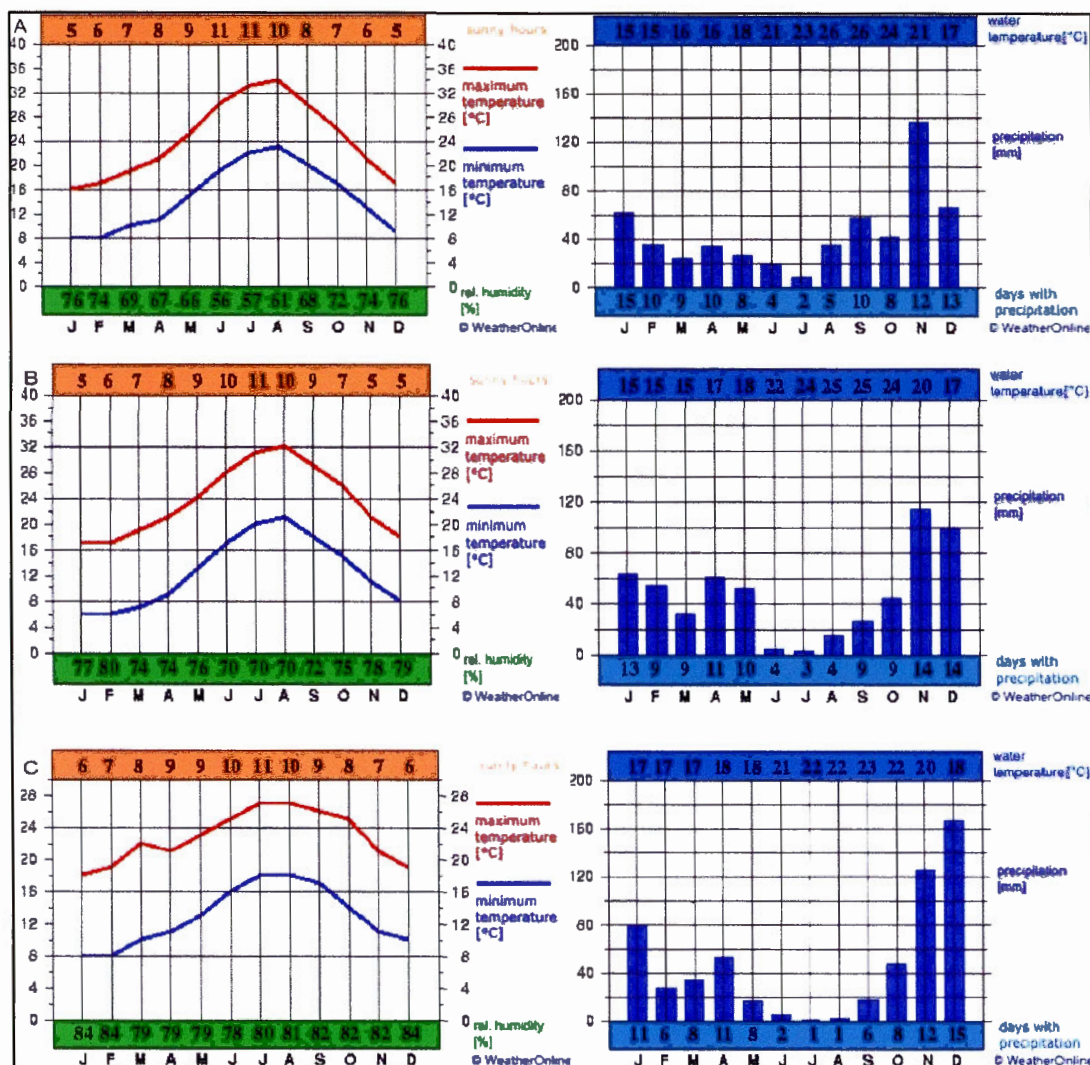


Figure B.4 Climatogramme des précipitations (en mm) et températures moyennes (en °C) mensuelles (moyennes calculées sur la période 1971-2000) pour les trois pays du Maghreb : A : Algérie, B : Tunisie, et C : Maroc (Source : www.weatheronline.co.uk, consulté le 15-03-2013). Les valeurs en orange et en vert pour chaque mois (haut et bas de chaque graphique) correspondent aux nombres d'heures d'ensoleillement (en heures) et à l'humidité relative (en %) moyennes mensuelles.

Tableau B.1 Précipitation moyenne annuelle et intervalle de variation de celle-ci dans les trois pays du Maghreb, établis sur la période de 1961 à 2000 (Source : Filali, 2004).

	Pluie moyenne (en mm)	Intervalle de variation (en mm)	Durée de la saison sèche (en mois)
Maroc	217	100 à 1500	6
Algérie	89	0 à 500	5
Tunisie	207	100 à 1500	6

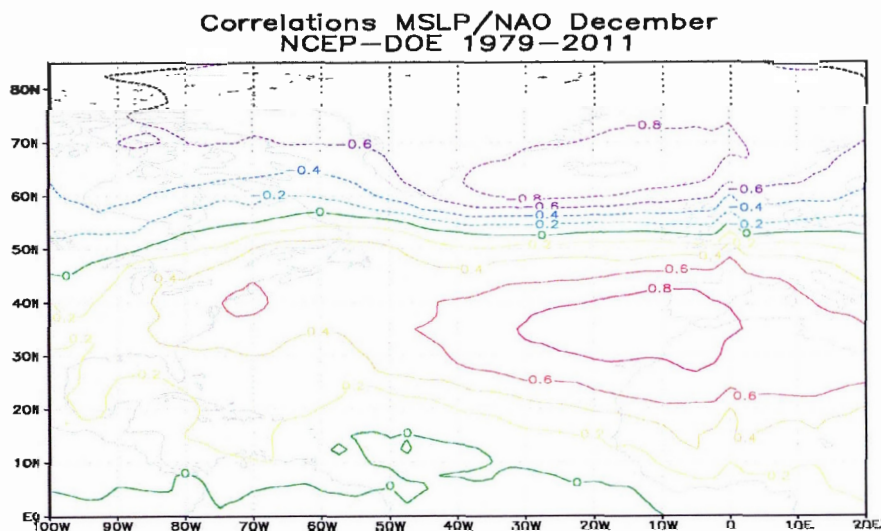


Figure B.5 Corrélations de Spearman entre les anomalies de l'indice ONA (Oscillation Nord-Atlantique) et celles du champ de pression au niveau moyen de la mer pour le mois de décembre pour l'ensemble de l'Atlantique Nord, en utilisant les réanalyses NCEP/DOE sur la période 1979-2011 (gracieuseté de Rabah Aider).

ANNEXE C

EXEMPLES D'EFFETS DES ALÉAS HYDROMÉTÉOROLOGIQUES AU MAGHREB

Tableau C.1 Quelques exemples d'aléas hydrométéorologiques majeurs en Tunisie de 1980 à 2012

Mois et années	Situations	Conséquences (Lieu)	Sources
Octobre 1982	Une forte pluie à Sfax (précipitations intenses : 177 mm en 13 h).	Inondations; (Sfax)	(Sakiss et Sassi, 1982)
Janvier 2003	Une pluie intense dans le Nord-Ouest de la Tunisie avec 180 mm en 24 h a provoqué la crue de l'oued Medjerda.	Inondations; (Nord-Ouest de la Tunisie)	(Balti, 2003)
Septembre 2003	Le District de Tunis a connu un chiffre record de précipitations : 140 mm en 2 h	Inondations; (Tunis)	(Chouari, 2006)
Octobre 2007	De fortes pluies, les précipitations, dépassant par endroits les 174 millimètres.	Inondations; (Tunis)	(Fehri et al., 2009)

Septembre 2009	Une pluie intense dans le Nord-Ouest de la Tunisie; 105 mm en 35 minutes sur le centre-ville.	Inondations; (Nord-Ouest de la Tunisie)	(Daoud et Dahech, 2012; Daoud et Dahech, 2012)
Octobre 2011	Des pluies torrentielles, des oueds en crue. Une grosse pluviosité et des millions de m ³ d'eau se sont déversés sur tout la Tunisie, durant 24 h; (Tableau C.2)	Inondations; (Nord-Ouest de la Tunisie)	(Fehri, 2014)
Février 2012	Une vague de froid très intense avec de la neige dans le Nord de la Tunisie. Avec de récentes pluies diluviennes aggravées par la fonte des neiges et les débordements des oueds. (Tableau C.3)	Inondations et gel; (Nord de la Tunisie)	(Mjejjra, 2012)

Tableau C.2 Les quantités de pluie enregistrées dans toutes les régions en millimètre durant 24 h le 30 octobre 2011; (<http://www.meteo.tn/htmlfr/accueil.php>)

	Tunis	Ariana	Ben Arous	Manouba	Zaghouan	Nabeul	Bizerte	Siliana	Bèja	Sousse
Quantités de pluie (en mm)	115	95	120	90	180	156	106	95	64	130

Tableau C.3 Les quantités de pluie enregistrées dans toutes les régions [en millimètre] le 23 février 2012; (<http://www.meteo.tn/htmlfr/accueil.php>)

	Jendouba	Bousselem	Ghardimaou	Fernana	Ain Drahem	Tabarka	Oued Mliz
Quantités de pluie (en mm)	113.8	102.1	110.1	118.5	586.0	373.0	107.0

Tableau C.4 Quelques exemples d'aléas hydrométéorologiques majeurs en Algérie de 2000 à 2012

Mois et années	Situations et dégâts	Conséquence (Lieu)	Sources
Novembre 2001	Des précipitations particulières tant par leur intensité que par la quantité. Le cumul des pluies a atteint 262,2 mm en 24 h	Inondations; (Alger)	(Djellouli et al., 2003)
2002-2003-2004-2005	Sècheresse.	Stress hydrique, baisse des rendements agricoles; (Algérie)	(Medejerab, 2009)
Octobre 2008	Un épisode de pluies diluviennes qualifiées de « tsunami fluvial » accompagné de violents orages frappe la ville de Ghardaïa, située en région aride du Sahara Nord Algérien (150 mm en une heure).	Inondations; décès humains; (Ghardaïa)	(Medejerab, 2009)
Octobre 2011	Des pluies diluviennes et de violents orages	Inondations; décès	http://naturealerte.blogspot

	accompagnés de rafales de vent dans cinq départements du Sud se sont abattus au Sud du pays.	humains; (Sud de l'Algérie)	ot.ca/2011/10/03102011-algerie-el-bayadh-inondation-10.html
Février 2012	Une vague de froid. La Kabylie a été recouverte par plus d'un mètre de neige au-dessus de 1200 mètres. Le dégel en cours accompagné de fortes pluies, Oueds en crue et des barrages remplis à ras bord.	Inondations et gel; (Kabylie)	http://www.2012un-nouveau-paradigme.com/article-la-vague-de-froid-s-etend-au-nord-de-l-afrique-alger-sous-la-neige-98611262.html

Tableau C.5 Les quantités de précipitations cumulées en février 2012, sur l'Est et le Nord-Est de l'Algérie (www.actualite.lachainemeteo.com)

	Jijel	Béjaia	Alger	Médéa	Chleff
Cumul total de pluie en février 2012 (en mm)	403	323	276	214	141

Tableau C.6 Quelques exemples d'aléas hydrométéorologiques majeurs au Maroc de 1980 à 2012

Mois et années	Situations et dégâts	Conséquence (Lieu)	Sources
Novembre 2002	Fortes pluies, plus que 100 mm en trois heures.	Inondations : (à Berrechid et Mohammadia)	(Agoumi, 2003)
2003-2004-2005-2006	Sècheresse.	Stress hydrique : dépérissement, baisse des rendements agricoles	(Chafai Elalaoui, 2006 ; Berkane, 2004)
Décembre 2010	Les fortes pluies qui s'abattent sur le Maroc de durée de 48 heures; 178 mm de pluie sont tombés à Casablanca.	Inondations; (Casablanca)	http://www.yabiladi.com/articles/details/3808/inondations-maroc-lourd-bilan-humain.html
Mars 2011	Une vague de pluies de printemps diluviennes. 200 mm de pluie sont tombés en 2 h à Rabat.	Inondations; (Rabat)	(Saïdi et al., 2013)
Février 2012	Une vague de froid s'abat pendant plusieurs jours sur le Maroc avec des températures allant de -8 °C à -2 °C.	Inondations et gel; (Maroc)	http://www.bladi.net/vague-froid-polaire-maroc.html

ANNEXE D

ANALYSES DES LIENS ENTRE LES TEMPÊTES, ONA ET LA PRÉCIPITATION

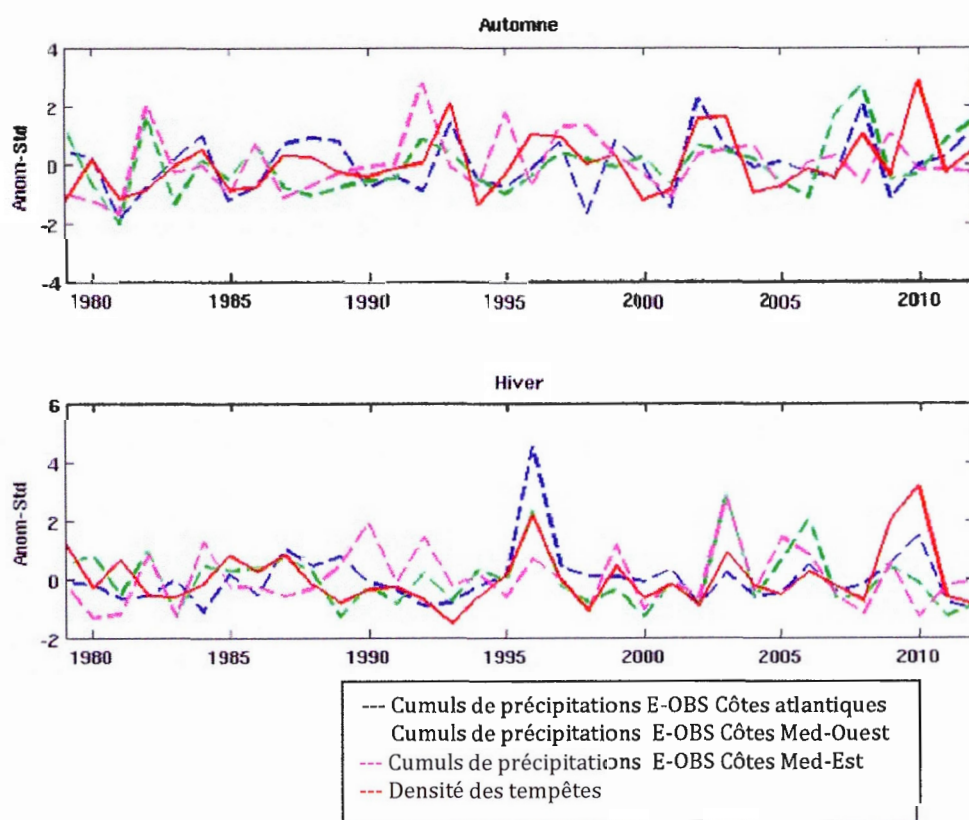


Figure D.1 Variabilités interannuelles des anomalies pour les cumuls de précipitations et les densités des tempêtes sur les trois régions du Maghreb, durant les saisons (Automne et Hiver), sur la période 1979-2012.

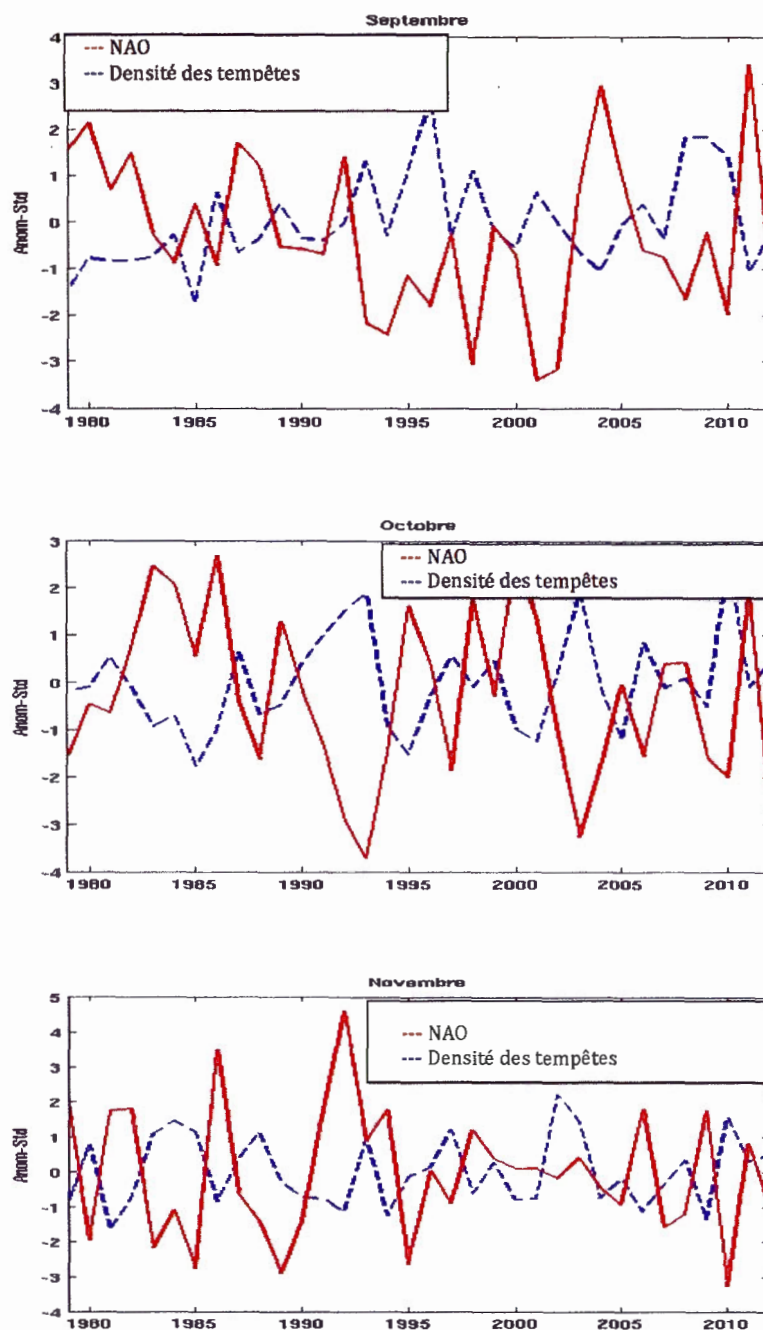


Figure D.2 Variabilités interannuelles des anomalies pour l'ONA et les densités des tempêtes sur le Maghreb, durant la saison d'automne (SON), sur la période 1979-2012.

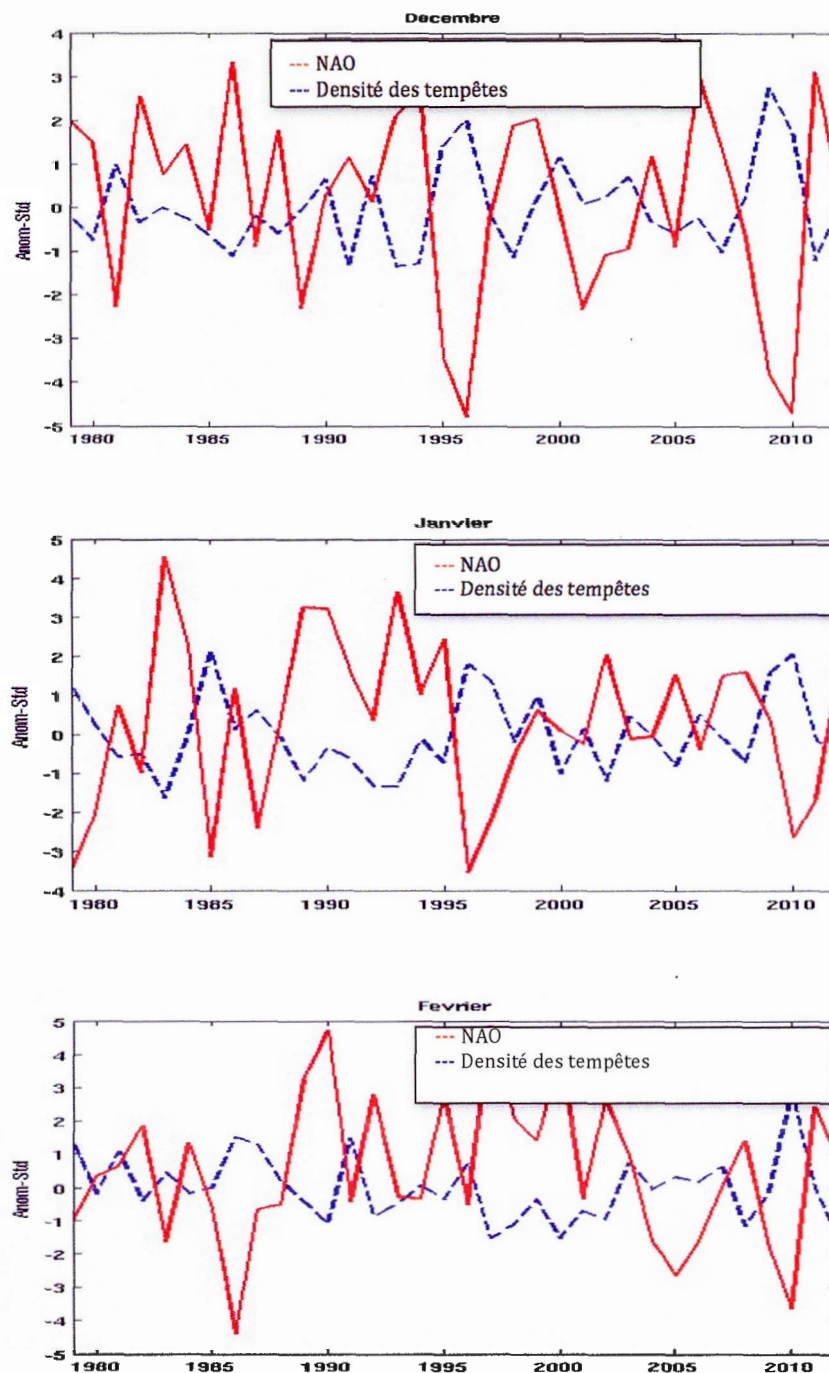


Figure D.3 Idem pour la figure D.2, mais pour la saison d'hiver (DJF).

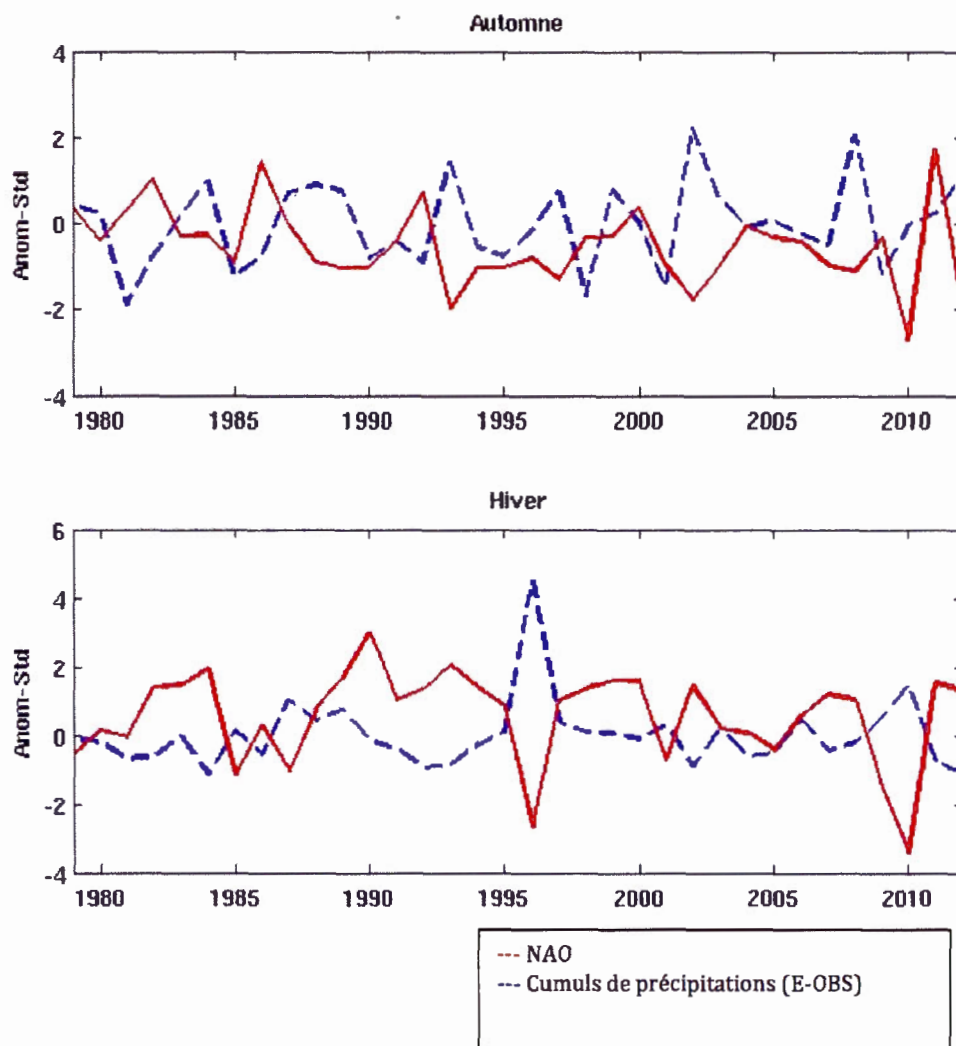


Figure D.4 Variabilités interannuelles des anomalies pour l'oscillation Nord-Atlantique et les cumuls de précipitations sur les côtes atlantiques, durant les deux saisons (Automne et Hiver), sur la période 1979-2012.

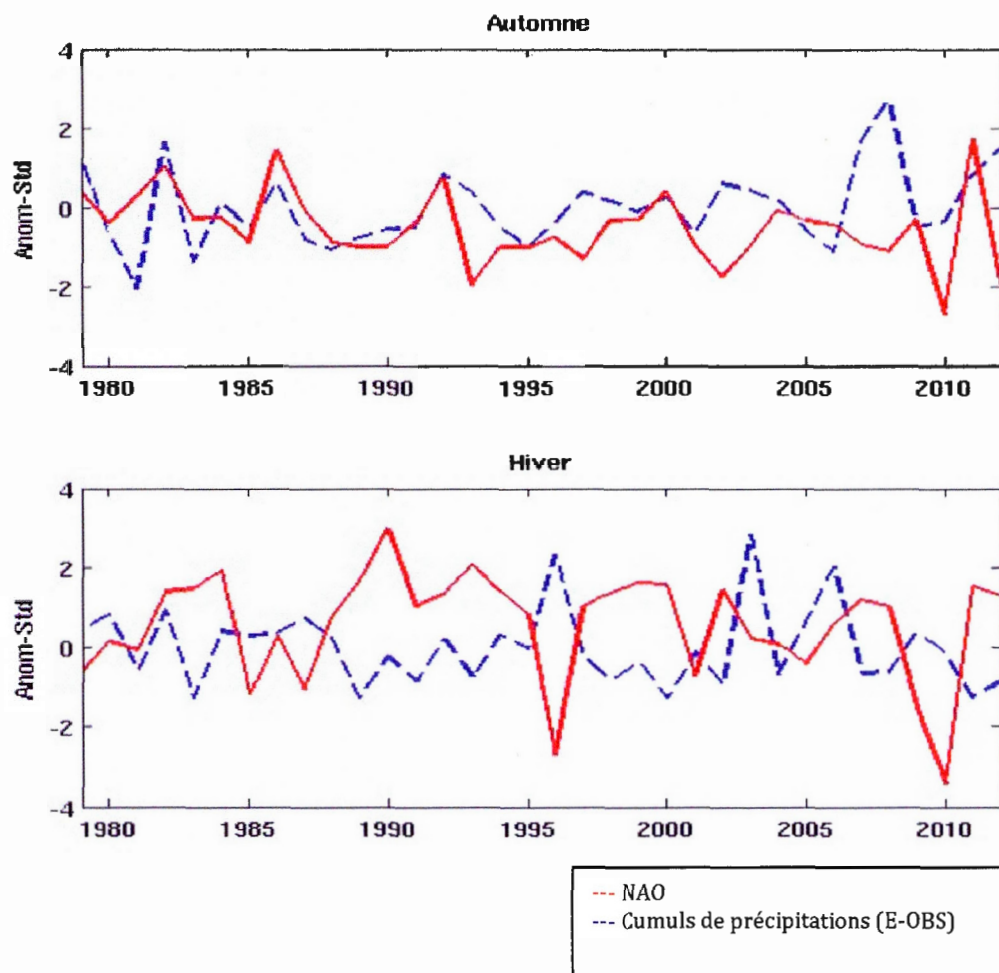


Figure D.5 Variabilités interannuelles des anomalies pour l'oscillation Nord-Atlantique et les cumuls de précipitations sur les côtes méditerranéennes Ouest, durant les deux saisons (Automne et Hiver), sur la période 1979-2012.

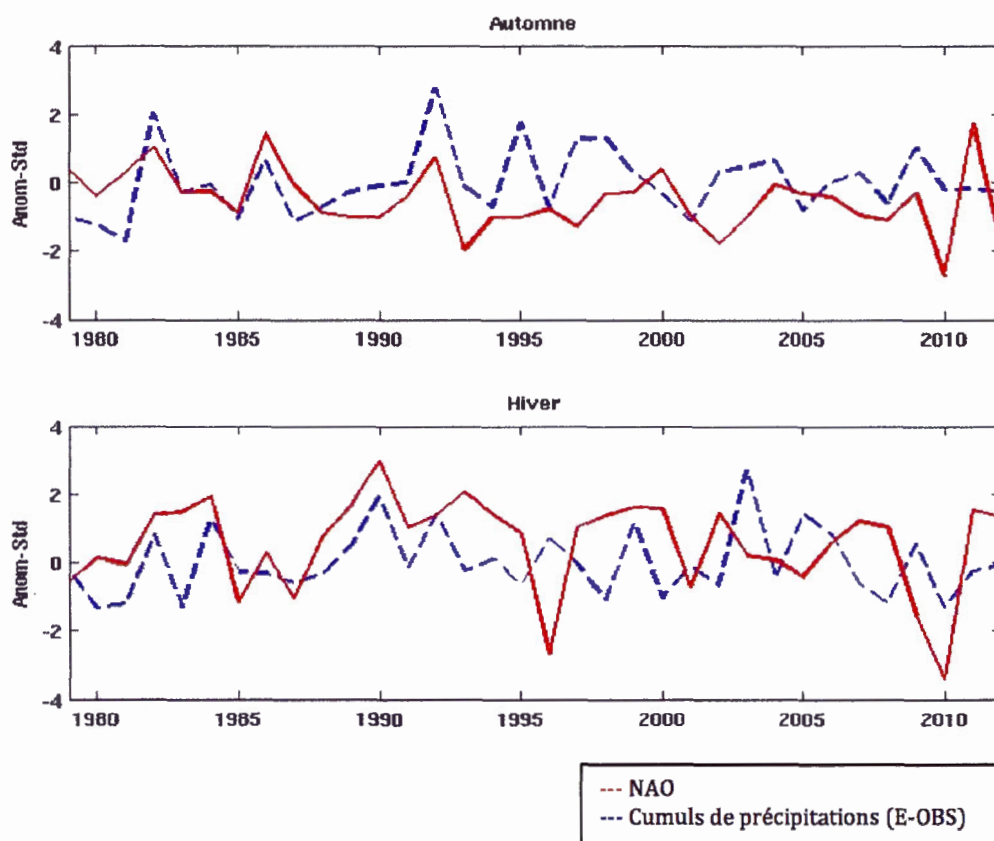


Figure D.6 Variabilités interannuelles des anomalies de l'oscillation Nord-Atlantique et les cumuls de précipitations sur les côtes méditerranéennes Est, durant les deux saisons (Automne et Hiver), sur la période 1979-2012.

Tableau D.1 Corrélations de Spearman, Kendall et Pearson entre les anomalies saisonnières (automne, SON, et hiver, DJF) de l'ONA et celles des caractéristiques des tempêtes (en termes de densité, vitesse de déplacement, circulation et intensité) durant la période 1979-2012, avec \underline{X} = 99 %, X = 95 % et \underline{X} = 90 % avec (X = 1-p-value)

Spearman						
SON		ONA		Vitesse	Circulation	Intensité
	ONA	1	0,6701	-0,5702	-0,4924	-0,5295
	Densité	<u>-0,6701</u>	1	0,8718	0,7865	0,8282
	Vitesse	<u>-0,5702</u>	<u>0,8718</u>	1	0,7595	0,7941
	Circulation	<u>-0,4924</u>	<u>0,7865</u>	<u>0,7595</u>	1	0,9223
	Intensité	<u>-0,5295</u>	<u>0,8282</u>	<u>0,7941</u>	<u>0,9223</u>	1
DJF		ONA	Densité	Vitesse	Circulation	Intensité
	ONA	1	-0,7352	-0,5915	-0,7349	-0,734
	Densité	<u>-0,7352</u>	1	0,8284	0,7769	0,8512
	Vitesse	<u>-0,5915</u>	<u>0,8284</u>	1	0,7867	0,8537
	Circulation	<u>-0,7349</u>	<u>0,7769</u>	<u>0,7867</u>	1	0,9431
	Intensité	<u>-0,734</u>	<u>0,8512</u>	<u>0,8537</u>	<u>0,9431</u>	1
Kendall						
SON		ONA	Densité	Vitesse	Circulation	Intensité
	ONA	1	-0,4854	-0,397	-0,3324	-0,3569
	Densité	<u>-0,4854</u>	1	0,698	0,6133	0,6626
	Vitesse	<u>-0,397</u>	<u>0,698</u>	1	0,5836	0,6125

	Circulation	<u>-0,3324</u>	<u>0,6133</u>	<u>0,5836</u>	1	0,7899
	Intensité	<u>-0,3569</u>	<u>0,6626</u>	<u>0,6125</u>	<u>0,7899</u>	1
DJF		ONA	Densité	Vitesse	Circulation	Intensité
	ONA	1	-0,5469	-0,4241	-0,5466	-0,5467
	Densité	<u>-0,5469</u>	1	0,6772	0,6057	0,6855
	Vitesse	<u>-0,4241</u>	<u>0,6772</u>	1	0,5911	0,6791
	Circulation	-0,5466	0,6057	0,5911	1	0,8064
	Intensité	<u>-0,5467</u>	<u>0,6855</u>	<u>0,6791</u>	<u>0,8064</u>	1
Pearson						
SON		ONA	Densité	Vitesse	Circulation	Intensité
	ONA	1	-0,6312	-0,5594	-0,5078	-0,5576
	Densité	<u>-0,6312</u>	1	0,8749	0,7712	0,8421
	Vitesse	<u>-0,5594</u>	<u>0,8749</u>	1	0,7491	0,8061
	Circulation	<u>-0,5078</u>	<u>0,7712</u>	<u>0,7491</u>	1	0,9245
	Intensité	<u>-0,5576</u>	<u>0,8421</u>	<u>0,8061</u>	<u>0,9245</u>	1
DJF		ONA	Densité	Vitesse	Circulation	Intensité
	ONA	1	-0,765	-0,6238	-0,7543	-0,7466
	Densité	<u>-0,765</u>	1	0,8514	0,7889	0,851
	Vitesse	<u>-0,6238</u>	<u>0,8514</u>	1	0,8006	0,8765
	Circulation	<u>-0,7543</u>	<u>0,7889</u>	<u>0,8006</u>	1	0,9389
	Intensité	<u>-0,7466</u>	<u>0,851</u>	<u>0,8765</u>	<u>0,9389</u>	1

RÉFÉRENCES

- Abdella, K. et McFarlane, N. (1997). Parameterization of the surface- layer exchange coefficients for atmospheric models. *J Atmos Sci*, 54, 1850–1867.
- Abouabdillah, A., Oueslati, O., De Girolamo, A.M. et Porto, A. Lo. (2010). Modeling the impact of climate change in a mediterranean catchment (Merguellil, Tunisia). *Fresenius Environmental Bulletin*, 19(10 A), 2334-2347.
- Agoumi, A. (2003). Vulnérabilité des pays du Maghreb face aux changements climatiques. Besoin réel et urgent d'une stratégie d'adaptation et de moyens pour sa mise en œuvre. Maroc, Institut international du développement durable, 14.
- Alexander LV, Zhang X, Peterson TC, Caesar J, Gleason B, Klein Tank AMG, Haylock M, Collins D, Trewin B, Rahimzadeh F, Tagipour A, Rupa Kumar K, Revadekar J, Griffiths G, Vincent L, Stephen- son DB, Burn J, Aguilar E, Brunet M, Taylor M, New M, Zhai P, Rusticucci M, Vazquez-Aguirre JL (2006) Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J Geophys Res Atmos* 111 : D05109. doi:10.1029/2005JD006290
- Balti, N. (2003). Crues du mois de janvier (2003). Commissariat Régional au Développement Agricole de Jendouba, Arrondissement des Ressources en Eau, 25.
- Barker H.W., Cole J.N.S., Morcrette, J-J., Pincus, R., Räisänen, P., von Salzen, K. et Vaillancourt, P.A. (2008). The Monte Carlo independ- ent column approximation: an assessment using several global atmospheric models. *Q J R Meteorol Soc*, 134, 1463–1478.
- Barkhordarian, A., Bhend, J. et von Storch, H. (2012a). Consistency of observed near surface temperature trends with climate change projections over the Mediterranean region, *Climate Dynamics*, 38, 1695–1702.
- Barkhordarian, A., von Storch, H. et Zorita, E. (2012 b). Anthropogenic forcing is a plausible explanation for the observed surface specific humidity trends over the Mediterranean area. *Geophysical Research Letters*, 39(19), 1695–1702
- Barkhordarian, A., Bhend, J. et von Storch, H. (2013). The expectation of future

- precipitation change over the Mediterranean region is different from what we observe. *Climate Dynamics*, 40(1-2), 225-244.
- Bartholomé, E. et Belward, A. S. (2005). GLC2000 : a new approach to global land cover mapping from Earth observation data. *Int J Remote Sens*, 26(9), 1959-1977.
- Belaassal, A. (1998). Précipitations au Maroc et circulation atmosphérique au niveau 700 hPa, Méditerranée n° 1, Aix en Provence, 19-26.
- Bélair, S., Mailhot, J., Girard, C. et Vaillancourt, P. (2005). Boundary-layer and shallow cumulus clouds in a medium-range forecast of a large-scale weather system. *Mon Weather Rev*, 133, 1938-1960.
- Benoit, R., Côté, J. et Mailhot, J. (1989). Inclusion of a TKE boundary layer parameterization in the Canadian regional finite-element model. *Mon Weather Rev*, 117, 1726-1750.
- Berkane A. (2004). Caractérisation de la sécheresse et élaboration d'un modèle climatique pour la prévision des rendements et de la production des céréales au Maroc, 19-22.
- Blanc, P. et Le Grusse P. (2007). De la politique de l'offre à la gestion de la demande : une révolution hydraulique en Méditerranée. *Villes et Territoires du Moyen-Orient*, 1-16.
- Boer, G. J. et Lambert, S. J. (2001). Second order space-time climate difference statistics, *Clim. Dyn.*, 17, 213-218.
- Bolle, H. J. (2002). *Mediterranean climate: variability and trend*. Springer-Verlag, Berlin, 450pp.
- Bonett, D.G. et Wright, T.A. (2000). Sample size requirements for Pearson, Kendall, and Spearman correlations. *Psychometrika*, 65, 23-28.
- Born, K., Christoph, M., Fink, A.H., Knippertz, P., Paeth, H. et Speth, P. (2008). Moroccan Climate in the Present and Future: Combined View from Observational Data and Regional Climate Scenarios. In : *Climatic Changes and Water Resources in the Middle East and North Africa*. [Zereini, F. and H. Hötzl (eds.)]. Springer, Berlin, Heidelberg, 29-45.
- Bowley, A.L. (1901). *Elements of Statistics*, Londres, King and Son, 2e éd. 1902, 335 p.; 4e éd. 1920, 454 p.; trad. française sur la 5e éd. par L. Suret et G. Lutfalla, 1929.

- Brezina, T. (2000). Are deviants different from the rest of us? Using student accounts of academic cheating to explore a popular myth. *Teaching sociology*, 28, 71-78.
- Chafai, Elalaoui, A. (2006). Gestion du Risque Sécheresse au Maroc : Mise au point d'un Indicateur pour une Alerte précoce à la sécheresse. 14th International Soil Conservation Organization Conference. Water Management and Soil Conservation in Semi-Arid Environments, 14-19.
- Chouari, W. (2006). Les pluies torrentielles des 17 et 24 septembre 2003 dans le Grand Tunis : analyse météorologique et impacts immédiats. In : Les risques liés au temps et au climat, actes du XIXe colloque de l'AIC (Épernay), G. BELTRANDO, M. MADELIN et H. QUÉNOL édit., Édit. PRODIG, Paris, 166-171.
- International CLIVAR Project Office. (2003). CCI/CLIVAR Expert Team for Climate Change Detection Monitoring and Indices (ETCCDMI) First Team Meeting Report, 24-26 November 2003, Zuckerman Institute/Climatic Research Unit, East Anglia University, Norwich, UK. Southampton, UK, International CLIVAR Project Office (ICPO Publication Series, 77.
- Cook, K.H. et Vizi, E.K. (2012). Impact of climate change on mid-twenty-first century growing seasons in Africa. *Climate Dynamics*, 39(12), 2937-2955.
- Côté, J., Gravel, S., Méthot, A., Patoine, A., Roch, M. et Staniforth, A. (1998). The operational CMC-MRB Global Environmental Multiscale (GEM) model. Part I : design considerations and formulation. *Mon. Weather Rev.*, 126, 1373-1395.
- Criado-Aldeanueva, F., Soto-Navarro, F.J. et García-Lafuente, J. (2014). Climatic indices influencing the long-term variability of Mediterranean heat and freshwater budgets: the North Atlantic and Mediterranean Oscillations. *Atmosphere-Ocean*, 52(2), 103-114.
- Daoud, A. et Dahech, S. (2012). Résilience de l'agglomération de Sfax (Tunisie méridionale) face au changement climatique : essai d'évaluation. *Climatologie*, numéro spécial. *Climats et changement climatique dans les villes*, 109-126.
- Daoud, A. (2013). Retour d'expérience sur les inondations dans l'agglomération de Sfax (Tunisie méridionale) de 1982 à 2009 : de la prévention à la territorialisation du risque. *Revue géographique de l'Est*, 53, 1-2.

- Dee, D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda MA, Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C.M., Van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., Holm, E.V., Isaksen, L., Kallberg, P., Kohler, M., Matricardi, M., McNally, A.P., Monge-Sanz, B.M., Morcrette, J.J., Park, B.K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.N. et Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q J R Meteorol Soc*, 137, 553–597.
- Delage, Y. et Girard, C. (1992). Stability functions correct at the free convection limit and consistent for both the surface and Ekman layers. *Bound Layer Meteorol*, 58, 19–31.
- Delage, Y. (1997). Parameterising sub-grid scale vertical transport in atmospheric models under statically stable conditions. *Bound Layer Meteorol*, 82, 23–48.
- Denis, B., Laprise, R. et Caya, D. (2003). Sensitivity of a regional climate model to the lateral boundary conditions. *Climate Dyn*, 20, 107–126.
- Diaconescu, E. P., Gachon, P., Scinocca, P. et Laprise, R. (2014). Evaluation of daily precipitation statistics and monsoon onset/retreat over western Sahel in multiple data sets, *Clim Dyn*. DOI 10.1007/s00382-014-2383-2
- Dima, I. M. et Wallace, J. M. (2003). On the seasonality of the Hadley cell, *Journal of Atmospheric Science*, 60, 1522–1527.
- Djellouli, Y. (1990). Flores et climats en Algérie septentrionale. Déterminismes climatiques de la répartition des plantes. Thèse Doctorat es Sciences, Université des sciences et technique houari Boumediene, Alger, 210.
- Djellouli, Y. et Saci, A. (2003). Les inondations catastrophiques de novembre 2001 à Alger. *Publications de l'AIC*, 15, 320–328.
- Driouech, F., Déqué M. et Sánchez-Gómez, E. (2010). Weather regimes—Moroccan precipitation link in a regional climate change simulation. *Glob Planet Change*, 72, 1–10.
- Dükeloh, A., et Jacobeit, J. (2003). Circulation dynamics of Mediterranean precipitation variability 1948–98. *International Journal of Climatology*, 23, 1843–1866.
- Eshel, G. et Farrell, B.F. (2000). Mechanisms of Eastern Mediterranean rainfall

- variability. *Journal of Atmospheric Science*, 57, 3219–3232.
- Eshel, G., Cane, M.A. et Farrell, B.F. (2000). Forecasting Eastern Mediterranean drought. *Monthly Weather Review*, 128, 3618–3630.
- Eshel, G. (2002). Mediterranean climates. *Isr J Earth Sci*, 51, 157–168
- ESPERE Climate Encyclopaedia. (2006). English full version 2004 – 2006, URL of all PDF versions: <http://espere.mpch-mainz.mpg.de/documents/pdf/>, English offline version supported by the International Max Planck Research School on Atmospheric Chemistry and Physics, 399-420.
- Esper, J., Büntgen, U., Frank, D.C., Nievergelt, D. et Liebhold, A. (2007). 1200 years of regular outbreaks in alpine insects. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 274, 671–679.
- Fehri, N., Samaali, H. et Abaza, K. (2009). Les inondations catastrophiques du 13 octobre 2007 dans le secteur de Sabbalet Ben Ammar entre aléa climatique et responsabilité anthropique (Grand Tunis – Tunisie). *Revue Tunisienne de Géographie*, 40, 31-55.
- Fehri, N. (2014). L'aggravation du risque d'inondation en Tunisie : éléments de réflexion, *Physio-Géo*, 8, 149-175.
- Filali, B.A. (2004). Les enjeux stratégiques et défis majeurs de l'irrigation dans le Maghreb. *Projet INCOWADEMED*, acte du séminaire modernisation de l'agriculture irriguée, rabat, 2-8.
- Gachon, P., St-Hilaire, A., Ouarda, T. Nguyen, V.T.V., Lin, C., Milton, J., Chaumont, D., Goldstein, J., Hessami, M., Nguyen, T.D., Selva, F., Nadeau, M., Roy, P., Parishkura, D., Major, N., Choux M., et Bourque, A. (2005). A first evaluation of the strength and weaknesses of statistical downscaling methods for simulating extremes over various regions of eastern Canada. Sub-component, *Climate Change Action Fund (CCAF)*, Environment Canada, Final report, Montréal, Québec, Canada, 209.
- Gachon, P., Gauthier, N., Bokoye, A.I., Parishkura, D., Cotnoir, A., Tremblay, Y. et Vigeant, G. (2007). Groupe de travail II - Variabilité, extrêmes et changements climatiques au Sahel : de l'observation à la modélisation, 218 p. dans *Rapport des contributions canadiennes au projet ACOI-CILSS (#A030978-002)*; Appui aux capacités d'adaptation aux changements climatiques. Montréal : Environnement Canada, tome II.
- Gana, A. et El Amrani, M. (2006). Crise hydraulique au Maghreb : raréfaction de la

ressource ou problèmes de gestion?, Géocarrefour, 81(1), 37-50.

- Gao, X. et Giorgi, F. (2008). Increased aridity in the Mediterranean region under greenhouse gas forcing estimated from high resolution regional climate projections. *Global and Planetary Change*, 62(3-4), 195-209.
- García-Ruiz, J.M., López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S.M., Lasanta-Martínez, T. et Beguería, S. (2011). Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth-Science Reviews*, 105(3-4), 121-139.
- Giannakopoulos, C., Bindi, M., Moriondo, M., LeSager, P. et Tin, T. (2005). Climate change impacts in the Mediterranean resulting from a 2°C global temperature rise. A report for the WWF for a Living Planet. The global conservation organization, Gand, Switzerland, 75pp.
- Giorgi, F., et Bi, X. (2005a). Updated regional precipitation and temperature changes for the 21st century from ensembles of recent AOGCM simulations. *Geophysical Research Letters*, 32, L21715.
- Giorgi F., et Bi, X. (2005 b). Regional changes in surface climate interannual variability for the 21st century from ensembles of global model simulations. *Geophysical Research Letters*, 32, L13701.
- Giorgi, F. et Lionello, P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 63, 90-104.
- Giorgi, F. (2006). Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters*, 33, 707-715.
- Goodess, C., Osborn, T. et Hulme, M. (2003). The identification and evaluation of suitable scenario development methods for the estimation of future probabilities of extreme weather events. Tyndall Centre for Climate Change Research, Technical Report 4.
- Haylock, M., Hofstra, N., Tank, A. K., Klok, E., Jones, P. et New M. (2008). A European daily highresolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950-2006. *Journal of Geophysical Research*, 113, D20119.
- Hernández-Díaz, L., R. Laprise, L. Sushama, A. Martynov, K. Winger, B. Dugas, 2013 : Climate simulation over CORDEX Africa domain using the fifth-generation Canadian Regional Climate Model (CRCM5). *Clim. Dyn.*, 40(5-6), 1415-1433. DOI : 10.1007/s00382-012-1387-z, <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00382-012-1387-z>

- Hoerling, M., Eischeid, J., Perlwitz, J., Quan, X., Zhang, T. et Pegion, P. (2012). On the increased frequency of Mediterranean drought. *J. Climate*, 25, 2146-2161.
- Huffman, G.J., Adler, R.F., Morrissey, M.M., Bolvin, D.T., Curtis, S., Joyce, R., McGavock, B. et Susskind, J. (2001). Global precipitation at one-degree daily resolution from multisatellite observations. *J Hydrometeorol* 2, 36–50.
- Hurrell, J.W. (1995). Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation regional temperatures and precipitation. *Science*, 269, 676-679.
- Iglesias, A., Garrote, L. et Martín-Carrasco, F. (2009). Drought risk management in Mediterranean river basins. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 5, 11-16, doi : 10.1897/IEAM_2008-044.1.
- IPCC, (2014a). *Climate Change 2014. Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A : Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R. and White L.L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp.
- IPCC, (2014 b). *Climate Change 2014. Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B : Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Barros, V.R., Field, C.B., Dokken, D.J., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R. and White L.L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 688 pp.
- IPCC, (2013). *Summary for Policymakers. In : Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex V. and Midgley P.M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC, (2007a). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the*

- Intergovernmental Panel on Climate Change. [Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. and Miller H.L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- IPCC, (2007 b). Climate Change 2007 : Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds, 2007. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976 pp.
- Kain, J.S. et Fritsch, J.M. (1990). A one-dimensional entraining/detraining plume model and application in convective parameterization. *J Atmos Sci*, 47, 2784–2802.
- Kalnay, E. Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M. Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R., et Joseph, D.H. (1996). The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 437-471, DOI : 10.1175/1520-0477 (1996)077%3C0437:TNYRP%3E2.0.CO; 2.
- Kanamitsu. M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang, S-K., Hnilo, J.J., Fiorino. M. et Potter, G.L. (2002). NCEP–DOE AMIP-II reanalysis (R-2). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83, 1631–1643.
- Karsili, C. (2013). Calculation of past and present water availability in the Mediterranean region and future estimates according to the Thornthwaite water-balance model. Master degree thesis, in Physical Geography and Ecosystem Analysis Department of Physical Geography and Ecosystems Science, Lund University, Sweden,
- Kendall, M. (1938). A New Measure of Rank Correlation. *Biometrika*, 30(1–2), 81–89. (DOI doi:10.1093/biomet/30.1-2.81, JSTOR 2332226).
- Knippertz, P., Christoph, M. et Speth, P. (2003). Long-term precipitation variability in Morocco and the link to the large-scale circulation in recent and future climates, *Metorol. Atmos. Phys.*, 83, 67-88.
- Kuo HL (1965). On formation and intensification of tropical cyclones through latent heat release by cumulus convection. *J Atmos Sci*, 22, 40–63.
- La Banque Mondiale. (2011). Agriculture, valeur ajoutée (% du PIB). Récupéré de

<http://donnees.banquemondiale.org/indicateur/NY.GDP.PCAP.CD>.

- Lamb, P.J. et Pepler, R.A. (1987). North Atlantic Oscillation: Concept and application. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 68, 1218 – 1225.
- Lamb, P. J., El Hamly, M. et Portis, D. H. (1997). North-Atlantic Oscillation, *Geo Obs.*, 7, 103–113.
- Laprise, R., L. Hernández-Díaz, K. Tete, L. Sushama, L. Šeparović, A. Martynov, K. Winger and M. Valin, 2013: Climate projections over CORDEX Africa domain using the fifth-generation Canadian Regional Climate Model (CRCM5). *Clim. Dyn.*, 41(11) : 3219-3246, DOI : 10.1007/s00382-012-1651-2, <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00382-012-1651-2>
- Le Houerou, H.N., Claudin, J. et Pouget, M. (1979). Étude bioclimatique des steppes algériennes (avec une carte bioclimatique à 1/1 000 000°). *Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle d'Afrique du Nord*, 68, 33-74.
- Li, J. et Barker, H.W. (2005). A radiation algorithm with correlated-k distribution. Part I: local thermal equilibrium. *J Atmos Sci*, 62, 286–309
- Lionello, P., Bhend, J., Buzzi, A., Della-Marta, P. M., Krichak, S., Jansá, A., Maheras, P., Sanna, A., Trigo, I. F., et Trigo, R. (2006). Cyclones in the Mediterranean region: climatology and effects on the environment, in *Mediterranean Climate Variability*. In : Lionello, P., Malanotte-Rizzoli, P., Boscolo, R. (Eds.), *Mediterranean Climate Variability, Developments in Earth & Environmental Sciences 4*. Elsevier Ed, 324–372.
- Lionello, P. et Giorgi, F. (2007). Winter precipitation and cyclones in Mediterranean region: future climate scenarios in a regional simulation. *Advances in Geosciences*, 12, 153-158.
- Lionello, P. (2012). *The Climate of the Mediterranean Region, from the past to the future*, ISBN: 9780124160422, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, xxxv–xc.
- Mailhot, J., Bélair, S., Charron, M., Doyle, C., Joe, P., Abrahamowicz, A., Bernier, N.B., Denis, B., Erfani, A., Frenette, R., Giguère, A., Isaac, G.A., McLennan, N., McTaggart-Cowan, R., Milbrandt, J. et Tong, L. (2010). Environment Canada's experimental numerical weather prediction systems for the Vancouver 2010 winter Olympic and Paralympic games. *Bull Am Meteorol Soc*, 91(8), 1073–1085. doi:10.1175/2010BAMS2913.1

- Mariotti, A., et Struglia, M.V. (2002). The Hydrological Cycle in the Mediterranean Region and the Implications for the Water Budget of the Mediterranean Sea. *Journal of Climate*, 15, 1674-1690.
- Mariotti, A. et Dell'Aquila, A. (2012). Recent decadal climate changes in the Mediterranean region: roles of large-scale forcing versus regional processes. *Clim. Dynamics*, 38(5-6), 1129-1145, DOI : 10.1007/s00382-011-1056-7.
- Martín-Vide, J. et Lopez-Bustins, J. A. (2006). The Western Mediterranean Oscillation and rainfall in the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, 26, 1455–1475.
- Martynov, A., Sushama, L., Laprise, R., Winger, K. et Dugas, B. (2012). Interactive lakes in the Canadian regional climate model, version 5: the role of lakes in the regional climate of North America. *Tellus A*, 64, 16 226–16 245. doi:10.3402/tellusa.v64i0.16226
- Masson, V., Champeaux, J-L., Chauvin, F., Meriguet, Ch. Lacaze, R. (2003). A global database of land surface parameters at 1-km resolution in meteorological and climate models. *J Clim*, 16, 1261–1282. http://www.cnrm.meteo.fr/gmme/PROJETS/ECOCLIMAP/page_ecoclimap.htm
- Matti, C., Pauling, A., M., Kuttel, et Wanner, H. (2009). Winter precipitation trends for two selected European regions over the last 500 years and their possible dynamical background. *Theor. Appl. Climatol*, 95, 9–26.
- McFarlane, NA. (1987). The effect of orographically excited gravity wave drag on the general circulation of the lower stratosphere and troposphere. *J Atmos Sci*, 44, 1775–1800.
- Mearns, L.O., Giorgi, F., Whetton, P., Pabon, D., Hulme, M. et Lai, M. (2003). Guidelines for use of climate scenarios developed from Regional Climate Model experiments. Data Distribution Center of the International Panel of Climate Change.
- Medejerab, A. (2009). Les inondations catastrophiques du mois d'octobre 2008 à Ghardaïa Algérie. *Geographia Technica (NS)*, 311-316.
- Mjejra M. (2012). Cartographie de l'impact des inondations de février 2012 sur le secteur agricole à la basse vallée de Medjerda en Tunisie. XXVIe colloque de l'Association Internationale de Climatologie, 415-420.

- Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS). (2013). Vers un système d'alerte précoce à la sécheresse au Maghreb\OSS. Collection Synthèse n° 4, 84.
- Osborn, T.J., Briffa, K.R., Tett, S.F.B., Jones, P.D. et Trigo, R.M. (1999). Evaluation of the North Atlantic Oscillation as simulated by a coupled climate mode. *Climate Dynamics*, 15, 685–702.
- Paeth, H., Born, K., Girmes, R., Podzun, R. et Jacob, D. (2009). Regional climate change in tropical and Northern Africa due to greenhouse forcing and land use changes. *Journal of Climate*, 22(1), 114–132.
- Patricola, C.M. et Cook, K.H. (2010). Northern African climate at the end of the twenty-first century: an integrated application of regional and global climate models. *Climate Dynamics*, 35(1), 193–212.
- Pearson, k. (1895). Notes on regression and inheritance in the case of two parents. *Proceedings of the Royal Society of London*, 58, 240–242.
- Peixoto, J. P. et Oort, A. H. (1992). *Physics of Climate*, American Institute of Physics, New York, 520pp.
- Pincus, R., Barker, H.W. et Morcrette, J.J. (2003). A fast, flexible, approximate technique for computing radiative transfer in inhomogeneous cloud fields. *J Geophys Res*, 108. doi:10.1029/2002JD003322.
- Portis, D.H., Walsh, J.E., El Hamly, M. et Lamb, P.J. (2001). Seasonality of the North Atlantic Oscillation, *J. Climate*, 14, 2069–2078.
- Prokhorov, A.V. (2001). Kendall coefficient of rank correlation, in Hazewinkel, Michiel, *Encyclopedia of Mathematics*, Springer, ISBN 978-1-55608-010-4.
- Räisänen, J. (1997). Objective comparison of patterns of CO₂ induced climate change in coupled GCM experiments, *Clim. Dyn.*, 13, 197–211.
- Roy, P., Gachon, P. et Laprise. R. (2012). Assessment of summer extremes and climate variability over the north-east of North America as simulated by the the Canadian Regional Climate Model, *International Journal of Climatology*, 32, 1615–1627. DOI : 10.1002/joc.2382.
- Saïdi, H. (1977). Classification des périodes de pluie en fonction de la situation météorologique, *Institut National de la Météorologie, Tunis*, 23–39.
- Saïdi, M. M., Bouloumou, Y., Ed-Daoudi, S. et Aresmouk, M.H. (2013). Les crues de

l'oued Issil en amont de Marrakech (Maroc), un risque naturel récurrent. *European Scientific Journal*, 9(23), 189-208.

- Sakiss, N. et Sassi, N. (1982). Les inondations d'octobre 1982 à Sfax : Analyse statistique des données pluviométriques. Institut National de la Météorologie. Tunis.
- Schmidli, J., Goodess, C. M., Frei, C., Haylock, M. R., Hurrell, J., Ribalaygua, J. et Schmith, T. (2007). Statistical and dynamical downscaling of precipitation. An evaluation and comparison of scenarios for European Alps. *Journal of Geophysical Research*, 112, D04105. doi: [10.1029/2005JD007026](https://doi.org/10.1029/2005JD007026)
- Scinocca, J.F. et McFarlane, N.A. (2000). Anisotropy in the parameterization of drag due to orographically forced flows. *Q J R Meteorol Soc*, 126, 2353–2393.
- Simmons, A., Uppala, C., Dee, D., and S. Kobayashi (2007) : ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. ECMWF Newsletter No. 110, 25-35.
- Sinclair, R.M. (1997). Objective identification of cyclones and their circulation intensity, and climatology, *Weather and Forecasting*, 12, 595–612.
- Spearman, C. (1904). General intelligence, objectively determined and measured. *American Journal of Psychology*, 15, 201-293.
- Tabet-Aoul, M. (2010). Développement et environnement au Maghreb. Contraintes et enjeux, Québec, Institut québécois des hautes études internationales. 251 p. ISBN : 978-2-920027-41-1
- Taylor, K.E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J Geophys Res*, 106(D7), 7183–7192.
- Thivet, G. et Blinda, M. (2009). Réviser les stratégies hydrauliques, In CIHEAM et Plan bleu, Méditerranée 2009, Repenser le développement rural en Méditerranée, Presses de Sciences Po, Paris, France, 65-99.
- Toreti, A., Xoplaki, E., Maraun, D., Kuglitsch, F.G., Wanner, H. et Luterbacher, J. (2010). Characterisation of extreme winter precipitation in Mediterranean coastal sites and associated anomalous atmospheric circulation patterns. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(5), 1037-1050.
- Tramblay, Y., El Adlouni, S. et Servat, E. (2013). Trends and variability in extreme

- precipitation indices. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 3235–3248.
www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/13/3235/2013/
- Uppala, S., Dee, D., Kobayashi, S., Berrisford, P., et Simmons, A. (2008). Towards a climate data assimilation system: status update of ERA-Interim. *ECMWF Newslett*, 115, 12–18.
- van der Linden, P. et Mitchell, J.F.B. (2009). Climate change and its impacts: summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, Exeter, UK, 60pp.
- Verseghy, L.D. (2000). The Canadian land surface scheme (CLASS): its history and future. *Atmos-Ocean*, 38, 1–13.
- Verseghy, L.D. (2008). The Canadian land surface scheme: technical documentation-version 3.4. Climate Research Division. Science and Technology Branch. Environment Canada, 180pp.
- von Salzen K, McFarlane, N.A. (2002). Parameterization of the bulk effects of lateral and cloud-top entrainment in transient shallow cumulus clouds. *J Atmos Sci*, 59, 1405–1429.
- von Salzen, K., McFarlane, N.A. et Lazare, M. (2005). The role of shallow convection in the water and energy cycles of the atmosphere. *Clim Dyn*, 25, 671–688.
- von Salzen, K., Scinocca, J.F., McFarlane, N.A., Li, J., Cole, J.N.S., Plummer, D., Reader, M.C., Ma, X., Lazare, M. et Solheim, L. (2013). The Canadian fourth generation atmospheric global climate model (CanAM4). Part I: representation of physical processes. *Atmos- Ocean*, 51(1), 104–125. doi:10.1080/07055900.2012.755610.
- Ward, M.N., Lamb, P.J., Portis, D.H., El Hamly, M. et Sebbari, R. (1999). Climate Variability in Northern Africa: Understanding Droughts in the Sahel and the Maghreb. In : Navarra A (ed), *Beyond El Niño: Decadal and Interdecadal Climate Variability*. Springer Verlag, Berlin.
- Wehner M.F., Smith R.L., Bala G., et Duffy P. (2010). The effect of horizontal resolution on simulation of very extreme US precipitation events in a global atmosphere model. *Climate Dynamics*, 34(2-3), 241–247. doi:10.1007/s00382-009-0656-y.
- Xoplaki, E., Luterbacher, J., Burkard, R., Patrikas, I. et Maheras, P. (2000). Connection between the large-scale 500 hPa geopotential height fields

and precipitation over Greece during wintertime, *Clim. Res.*, 14, 129-146.

Xoplaki E. (2002). Climate variability over the Mediterranean. PhD thesis, University of Bern, Switzerland, http://sinus.unibe.ch/klimet/docs/phd_xoplaki.pdf.

Xoplaki, E., Gonzalez-Rouco, J.F., Luterbacher, J. et Wanner, H. (2004). Wet season Mediterranean precipitation variability: influence of the large-scale dynamics and trends. *Climate Dynamics*, 23, 63-78.

Yang, J., Jones, K.F., Yu, W. et Morris, R. (2012). Simulation of in-cloud icing events on Mount Washington with the GEM-LAM. *J Geophys Res*, 117, D17204. doi:10.1029/2012JD017520.

Zadra, A., Roch, M., Laroche, S. et Charron, M. (2003). The subgrid scale orographic blocking parameterization of the GEM model. *Atmos-Ocean*, 41, 155–170.

Zhang, G.J. et McFarlane, N.A. (1995). Sensitivity of climate simulations to the parameterization of cumulus convection in the CCC-GCM. *Atmos-Ocean*, 3, 407–446.